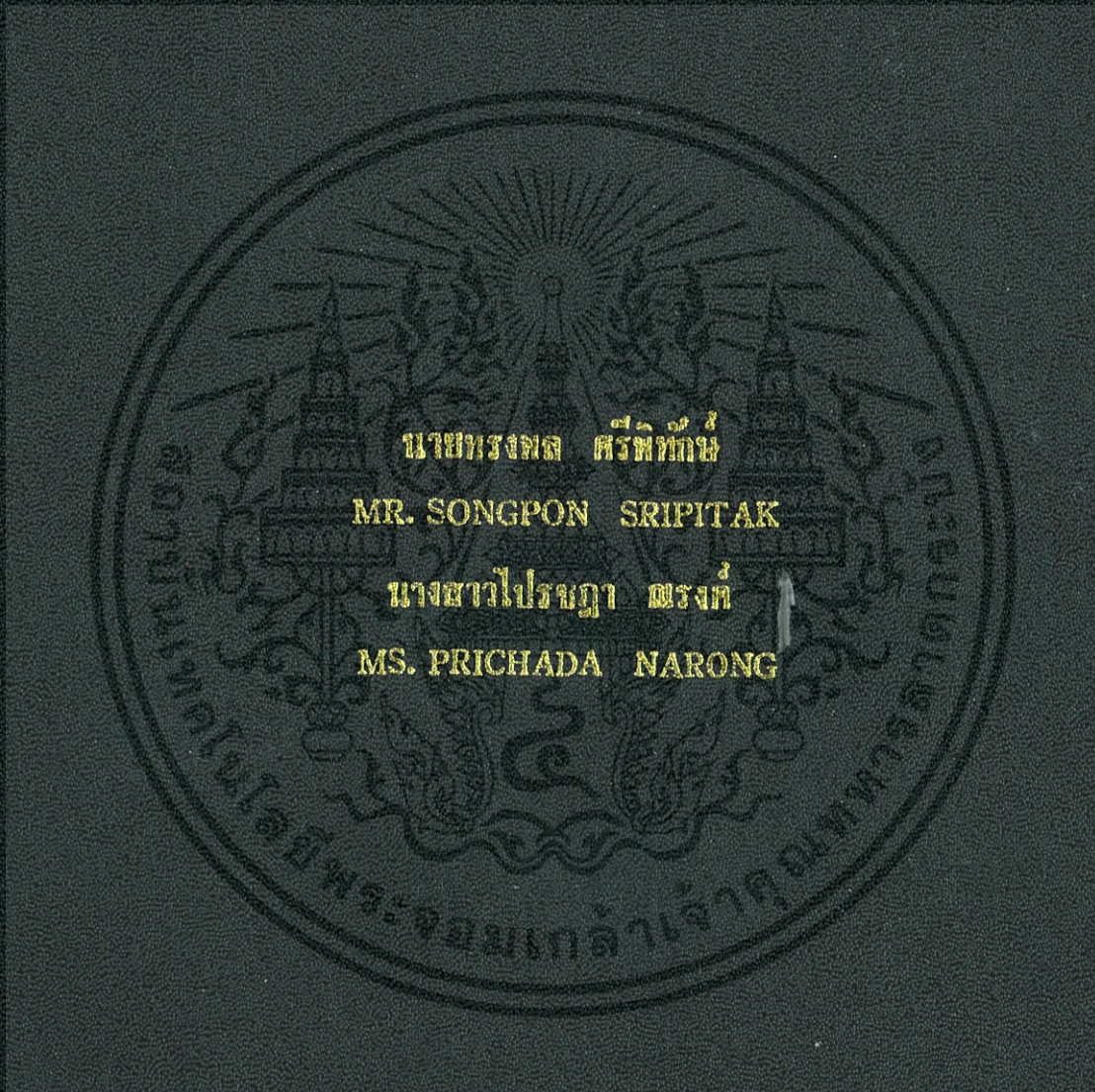


การพัฒนาการทดสอบความเค้นตกค้างด้วยวิธีโฟโตรีลาสติค

The Development of Residual Stress Testing by
Photoelastic



ปริญญาโท เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาการทดสอบความเค้นตกค้างด้วยวิธีโฟโตอีลาสติก
The Development of Residual Stress Testing by
Photoelastic



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Development of Residual Stress Testing by Photoelastic



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การพัฒนาการทดสอบความเค้นตกค้างด้วยวิธีโฟโต้เอลาสติก
The Development of Residual Stress Testing by Photoelastic

นักศึกษา

นายทรงพล ศรีพิทักษ์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 53010569
นางสาวไปรชญา ณรงค์ รหัสประจำตัวนักศึกษา 53011013

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ดร.วิภู ศรีสืบสาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาการทดสอบความเค้นตกค้างด้วยวิธีโพโต้ลาสติก			
นักศึกษา	นายทรงพล	ศรีพิทักษ์	รหัสนักศึกษา	53010569
	นางสาวโปรชญา	ณรงค์	รหัสนักศึกษา	53011013
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ			
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง			
ปีการศึกษา	2556			
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.วิภู ศรีสืบสาย			

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติกใสที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีด โดยใช้หลักการของโพโต้ลาสติกและหลักการของโพลาริสเซชันเป็นหลักของการทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติก จากนั้นออกแบบเครื่องทดสอบให้สอดคล้องกับหลักการข้างต้น โดยกำหนดว่าเครื่องทดสอบความเค้นจะต้องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและแผ่นโพลาริสซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้จะใช้จอ LCD และกล้องถ่ายรูปชนิด DSLR ที่มีพิวเตอร์ชนิดโพลาริส อุปกรณ์ทั้งสองสามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย เครื่องที่ได้ออกแบบนั้นจะเป็นเครื่องที่ป้องกันแสงภายนอกเข้ามารบกวนขณะทดสอบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของสีที่เกิดจากความเค้นแม่นยำขึ้น จากนั้นใช้โปรแกรม Matlab ในการพัฒนาโปรแกรมตรวจสอบความเค้น โดยเมื่อทำการทดสอบพบว่าเมื่อใส่แรงมากขึ้นความเค้นที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมจะมีค่ามากขึ้นตามซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการคำนวณความเค้นจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Solidwork)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Development of Residual Stress Testing by Photoelastic	
Student	Songpon	Sripitak
	Prichada	Narong
Degree	Bachelor Degree of Engineering in industrial Engineering	
	King Mongkut's Institute Technology of Ladkrabang	
Academic Year	2556	
Thesis Advisor	Dr.Wipoo	Sriseubsai

ABSTRACT

This thesis was studied on the residual stress testing in plastic which was made by injection molding process. The method of the residual stress testing used the principles of photoelastic and polarization. The designed machine was based on those principles. The residual stress testing machine was included with light source and polarized filter. In this study the LCD monitor and DSLR camera with polarized filter were used and those equipment would be easy to install and pull out. This machine protected the interference of external light to get more efficiency of the color accuracy by the stainless steel cover box. Then, residual stress test program was developed by using Matlab. The results showed the relationship between force and stress were direct variation and the results of the program were similar to the calculation results in the Solidwork

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยความกรุณาของ ดร.วิภู ศรีสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา
นิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดีคณะผู้จัดทำขอ
กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.พลชัย โขติปราชญ์กุลและ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ กรรมการสอบ
ปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำที่ดี ชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ ของโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. นิรันดร์ พิสุทธอนันท์ อาจารย์ที่ให้ความกรุณาในการให้คำแนะนำที่ดี
ชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ ของโครงการ

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้
คำแนะนำ ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดการศึกษาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณและขอใจ พี่บัณฑิต เพื่อน และน้องภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและภาควิชาอื่นๆที่ได้
ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ความห่วงใยและให้กำลังใจเสมอมารวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้เอื้อนามไว้ ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวซึ่งคอยให้กำลังใจและเป็นผู้ให้
ทุกสิ่งอย่างกับคณะผู้จัดทำ

นายทรงพล

ศรีพิทักษ์

นางสาวไพรชญา

ณรงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โพลาริเซชัน (Polarization).....	3
2.1.1 กระบวนการทำให้คลื่นแสงที่ไม่โพลาริไซส์ให้โพลาริไซส์.....	4
2.2 โฟโตอีลาสติคซิตี (Photoelasticity).....	7
2.3 พลาสติก (Plastic).....	9
2.4 ความเค้น (Stress).....	11
2.4.1 ความเค้นที่เกิดจากการฉีกพลาสติก.....	12
2.4.2 สนามความเค้น.....	12
2.5 ระบบสี RGB.....	13
2.6 โมเมนต์ของแรง.....	14
2.6.1 คาน.....	15
2.6.2 ประเภทของคาน.....	17
2.6.2.1 คานประเภทดีเทอร์มิเนต(Determinate Beam).....	17
2.6.2.2 คานประเภทอินดีเทอร์มิเนต (Indeterminate Beam).....	18
2.6.3 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดภายในคาน.....	19
2.6.4 ความเค้นดัด (Bending Stress).....	22
2.6.4.1 การเปลี่ยนรูปการดัดของคานตรง.....	24
2.6.4.2 การดัดของคานที่มีหน้าตัดไม่สมมาตร.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลอง	
3.1 การออกแบบเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง.....	31
3.1.1 การออกแบบเครื่อง.....	31
3.1.2 สร้างเครื่องทดสอบความเค้น.....	31
3.2 ศึกษาและเขียนโปรแกรม Matlab.....	33
3.3 การตรวจสอบเครื่องตรวจสอบความเค้น,โปรแกรมและการคำนวณ.....	34
3.3.1 การตรวจสอบการถ่ายภาพจากเครื่อง.....	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบเครื่องทดสอบความเค้นตกค้าง.....	36
4.2 ผลการทดลองที่ได้การคำนวณด้วยโปรแกรม.....	36
4.3 โปรแกรมโซลิตเว็คคำนวณความเค้น.....	42
4.4 เปรียบเทียบการคำนวณด้วยโปรแกรมMatlabกับโปรแกรมโซลิตเว็ค.....	44
4.5 เปรียบเทียบการคำนวณความเค้นกับโปรแกรมโซลิตเว็ค.....	46
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	48
5.2 วิจารณ์ผลการทดสอบ.....	48
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก.....	ผก1
ภาคผนวก ข.....	ผข1
ภาคผนวก ค.....	ผค1
ภาคผนวก ง.....	ผง1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าความหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด (Retardation).....	9
ตารางที่ 2.2 โมเมนต์ความเฉื่อยและโมดูลัสพื้นที่หน้าตัดของรูปพื้นที่หน้าตัดต่างๆ.....	29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การสั้นของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (a)หลายทิศทาง (b)ทิศทางเดียวหรือเชิงระนาบ	3
รูปที่ 2.2 โพลาริเซชันโดยการเลือกดูดกลืน ด้วยโพลาริซสองแผ่น	4
รูปที่ 2.3 การสะท้อน (a)กรณีทั่วไป (b)กรณีที่สะท้อนเป็นแสงโพลาริซ	5
รูปที่ 2.4 โพลาริซโดยการหักเหซ้อนในผลึกแคลไซต์	6
รูปที่ 2.5 การกระเจิงของแสงโดยโมเลกุลในอากาศ	7
รูปที่ 2.6 Michel-Levy interference color chart	8
รูปที่ 2.7 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่างๆ	11
รูปที่ 2.8 วิธีที่เกิเกิดขึ้นจากความเค้นตกค้างภายในประแจปากตาย	13
รูปที่ 2.9 ภาพวงจรีของแสงแบบแม่สีและแม่สีรอง	14
รูปที่ 2.10 ทิศทางของโมเมนต์	15
รูปที่ 2.11 ลักษณะของคาน	15
รูปที่ 2.12 คานอันดับ1	16
รูปที่ 2.13 คานอันดับ2	16
รูปที่ 2.14 คานอันดับ3	17
รูปที่ 2.15 คานประเภทดีเทอร์มิเนต	17
รูปที่ 2.16 คานประเภทอินดีเทอร์มิเนต	18
รูปที่ 2.17 ผลรวมทางพีชคณิตที่กระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงที่หน้าตัดใดๆของคาน	20
รูปที่ 2.18 การกำหนดเครื่องหมายของภาระที่กระทำต่อคาน	20
รูปที่ 2.19 คานเกิดแรงเฉือนภายในโมเมนต์ดัด	21
รูปที่ 2.20 (a)คานก่อนการเปลี่ยนรูป	23
รูปที่ 2.20 (b)คานหลังการเปลี่ยนรูป	23
รูปที่ 2.21 (a)เกิดขึ้นเมื่อคานเป็นรูปปริซึมตรง	24
รูปที่ 2.21 (b)คานก่อนรับภาระดัด	24
รูปที่ 2.21 (c)คานหลังรับภาระดัด	24
รูปที่ 2.21 (d)การไม่เปลี่ยนรูป	25
รูปที่ 2.21 (e)การเปลี่ยนรูป	25
รูปที่ 2.21 (f)การกระจายความเครียดปกติบนหน้าตัด	25
รูปที่ 2.22 การหาสูตรการดัด	26
รูปที่ 2.23 การแปรเปลี่ยนความเค้นดัด	27
รูปที่ 3.1 ส่วนแทนวางชิ้นงานและติดตั้งกล้อง	32
รูปที่ 3.2 ส่วนแทนวางจอ LCD	32
รูปที่ 3.3 เครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 Flowchart การทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์ความเค้น.....	33
รูปที่ 4.1 (ก)ริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 9.81.....	37
รูปที่ 4.1 (ข)ริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 19.62.....	37
รูปที่ 4.1 (ค)ริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 29.43.....	37
รูปที่ 4.1 (ง)ริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 39.24.....	37
รูปที่ 4.2 (ก)รูปริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 9.81 N ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น.....	38
รูปที่ 4.2 (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการ คำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 9.81 N.....	38
รูปที่ 4.2 (ค)รูปริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 19.62 N ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น.....	39
รูปที่ 4.2 (ง)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการ คำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 19.62 N.....	39
รูปที่ 4.2 (จ)รูปริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 29.43 N ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น.....	40
รูปที่ 4.2 (ฉ)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการ คำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 29.43 N.....	40
รูปที่ 4.2 (ช)รูปริ้วของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 39.24 N ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น.....	41
รูปที่ 4.2 (ฉ)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการ คำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 39.24 N.....	41
รูปที่ 4.3 โปรแกรมโซลิตเว็คแสดงแนวโน้มของริ้วสีเมื่อใส่แรงใดๆ.....	42
รูปที่ 4.4 (ก)ความสัมพันธ์ความเค้นกับระยะชิ้นงานจากการคำนวณโซลิตเว็คที่แรง 9.81.....	42
รูปที่ 4.4 (ข)ความสัมพันธ์ความเค้นกับระยะชิ้นงานจากการคำนวณโซลิตเว็คที่แรง 19.62.....	43
รูปที่ 4.4 (ค)ความสัมพันธ์ความเค้นกับระยะชิ้นงานจากการคำนวณโซลิตเว็คที่แรง 29.43.....	43
รูปที่ 4.4 (ง)ความสัมพันธ์ความเค้นกับระยะชิ้นงานจากการคำนวณโซลิตเว็คที่แรง 39.24.....	44
รูปที่ 4.5 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม.....	45
รูปที่ 4.5 (ข)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็ค.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ซึ่งต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกภายในประเทศมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากประเทศไทยมีอุตสาหกรรมการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกติดอันดับ 1 ใน 10 ของโลก[1]โดยกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดคือกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process)[2] ซึ่งกระบวนการนี้มักพบข้อบกพร่องขึ้นบนผลิตภัณฑ์ สาเหตุหนึ่งเนื่องจากความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลและการถ่ายเทความร้อนของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในแม่พิมพ์ฉีด ส่งผลให้เกิดความเค้นตกค้างสูงภายในชิ้นงานและเป็นสาเหตุหลักทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายตรงบริเวณนั้นได้ง่าย ความเค้นตกค้างเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงลดลงเพราะฉะนั้นจึงต้องมีการศึกษาการกระจายตัวของความเค้นตกค้างภายในผลิตภัณฑ์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและหาปัจจัยที่ทำให้เกิดความเค้นตกค้างภายในแล้วนำมาหาทางลดความเค้นตกค้างที่เกิดภายในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน โดยทั่วไปแล้ว ไม่สามารถมองเห็นสนามความเค้นได้ เว้นจะอาศัยวิธีการทดลองต่างๆ

การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างภายในพลาสติกนั้นก็จะมีหลายวิธีได้แก่ The chemical probe technique[3], Stress-Optical Behavior[4], The hole-drilling strain gage method[5] และ The Photoelasticity[6] เป็นต้น แต่วิธีที่ทางกลุ่มผู้วิจัยได้นำมาศึกษานั้นคือวิธี โพโตอลาสติกซิตี วิธีการทดลองนี้จะทำให้มองเห็นภาพของสนามความเค้นในรูปของริ้ว (fringe patterns) โดยที่รูปแบบของริ้วจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปร่างของตัวกลางและลักษณะการกระทำของภาระภายนอกต่อตัวกลางนั้น โดยวิธีโพโตอลาสติกซิตีเป็นวิธีที่เก่าแก่และใช้งานได้ง่ายโดยที่ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีโพโตอลาสติกซิตีมากนักโดยจะมีหลักการทดสอบคือนำแสงส่องผ่านพลาสติกใสที่มีแผ่นโพลาไรซ์ประกบอยู่ และถ่ายภาพความเค้นที่ปรากฏบนพลาสติกออกมาตรวจสอบเพื่อหาค่าความเค้นตามสีที่ปรากฏอยู่ในภาพที่ถ่ายได้ ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อจำกัดคือในการตรวจสอบคือจะสามารถตรวจสอบได้เฉพาะพลาสติกใสเท่านั้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยหาความเค้นตกค้างภายในพลาสติกและทำการเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยวิเคราะห์แนวโน้มของความเค้นตกค้าง โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายและสะดวกในการถ่ายภาพเพื่อนำภาพมาวิเคราะห์และพยายามที่จะทำให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่มีราคาถูกและเป็นมาตรฐานในการตรวจสอบความเค้นตกค้างด้วยหลักการของ Photoelasticity

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาเครื่องทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติก
2. เพื่อประยุกต์ใช้จอภาพ LCD และกล้อง DSLR มาเป็นอุปกรณ์ทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติก
3. เพื่อพัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ริ้วสีและคำนวณหาค่าความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. พัฒนาเครื่องทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติกให้มีการทำงานเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์
2. ออกแบบเครื่องทดสอบความเค้นตกค้างในพลาสติกให้สามารถถอดใส่จอภาพ LCD ขนาด 19"-21" และกล้อง DSLR ได้อย่าง สะดวกในการใช้งานแต่ละครั้ง
3. ใช้โปรแกรม Matlab ช่วยในการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถแสดงผลของค่าความเค้น ณ บริเวณที่สนใจได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้างไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนได้
2. สามารถนำเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้างไปเป็นเครื่องต้นแบบเพื่อการพัฒนาและต่อยอดสำหรับเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้างของพลาสติกต่อไป
3. สามารถหาค่าความเค้นบนพลาสติกใสได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 2.จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

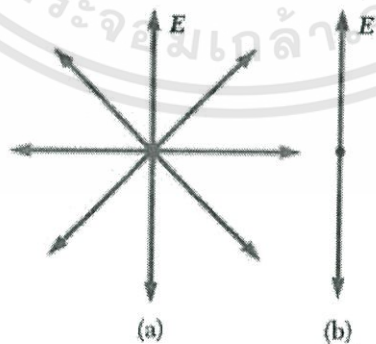
ในการสร้างเครื่องทดสอบความเค้นตึงในพลาสติกที่มีกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดมีหลักการหลายอย่างที่ต้องศึกษาเพื่อใช้ในการปฏิบัติงาน หลักการที่เกี่ยวข้องได้แก่

- 2.1 โพลาริเซชัน (Polarization)
- 2.2 โฟโตอลาสติกซิตี (photoelasticity)
- 2.3 พลาสติก (Plastic)
- 2.4 ความเค้น (Stress)
- 2.5 ระบบสี RGB
- 2.6 โมเมนต์ของแรง (moment of force)

2.1. โพลาริเซชัน (Polarization) [7]

การที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีเวกเตอร์สนามไฟฟ้า(E) อยู่ในทิศทางเดียว ทิศของสนามไฟฟ้านี้เรียกว่าเป็นทิศโพลาริเซชันของคลื่น กรณีที่คลื่นมีสนามไฟฟ้าอยู่ในหลายทิศทางจะเป็นคลื่นแบบไม่โพลาริส์ (Unpolarized Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a)

โพลาริเซชันของแสงมีหลายชนิด แสงจะมีโพลาริส์เชิงเส้น (Linear Polarization) หรือโพลาริส์เชิงระบบ (Plane Polarization) ถ้าสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศทางเดียวตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b) โพลาริเซชันแบบอื่นๆ



รูปที่ 2.1 การสั่นของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (a) หลายทิศทาง (b) ทิศทางเดียวหรือเชิงระบบ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คลื่นแสงที่ไม่โพลาไรส์ สามารถทำให้โพลาไรส์ได้ด้วยกระบวนการ

2.1.1.1 โพลาไรเซชันโดยการเลือกดูดกลืน

วัสดุที่มีสมบัติไดโครอิก(Dichroic) ยอมให้แสงที่มีทิศโพลาไรเซชันเดียวผ่านและดูดกลืนแสง ในที่มีระนาบโพลาไรเซชันอื่นๆ เมื่อนำมาสังเคราะห์เป็นแผ่นโพลาไรส์ (Polariser) จะทำให้แสงที่ส่องผ่านมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าสั้นในทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โพลาไรเซชันโดยการเลือกดูดกลืนด้วยแผ่นโพลาไรส์สองแผ่น [7]

การใช้แผ่นโพลาไรส์สองแผ่น เรียกว่า Polariser และ Analyser ตามลำดับการวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงสามารถลดความเข้มของแสงเป็นค่าต่างๆได้ดังนี้

เมื่อแสงผ่าน Polariser(แผ่นแรก) คลื่นแสงจะมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้า E_1 สั้นในทิศทางเดียว เมื่อแสงผ่านแผ่นที่สอง Analyser ที่มีสมบัติเหมือนกัน แต่บิดแนวแกนเป็นมุม θ เทียบกับตัวแรก คลื่นแสงผ่านตัวที่สองจะมีค่าสนามไฟฟ้าลดลงเป็น E_2 ที่มีค่า

$$E_2 = E_1 \cos \theta \quad (2.1)$$

เมื่อ

E_1 คือ ค่าสนามไฟฟ้าเริ่มต้น

E_2 คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ลดลง

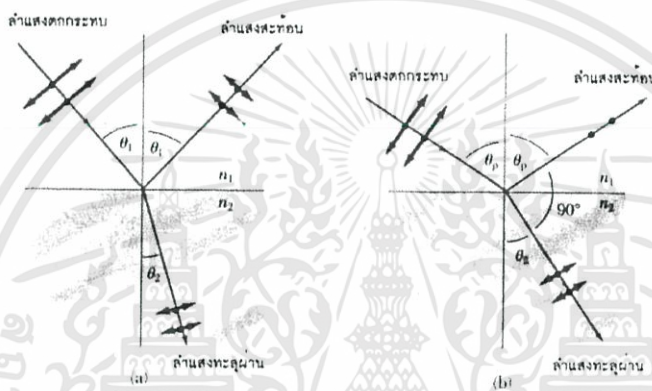
θ คือ มุมที่บิดไป

จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าความเข้มแสง (I) แปรผันตามค่าสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง ดังนั้น เรียกว่า Malus's law ใช้กับแสงที่โพลาไรส์เชิงเส้นหรือเชิงระนาบเท่านั้น

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (2.2)$$

2.1.1.2 การสะท้อน

เมื่อแสงที่ไม่โพลาไรส์ตกกระทบบนผิวรอยต่อระหว่างตัวกลาง n_1 และ n_2 ดังรูปที่ 2.3 แสงที่สะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรส์ได้ เมื่อมุมระหว่างรังสีสะท้อนกับรังสีหักเหเป็นมุมฉาก



รูปที่ 2.3(a) กรณีทั่วไป

รูปที่ 2.3(b) กรณีที่สะท้อนเป็นแสงโพลาไรส์ [7]

รูปที่ 2.3 การสะท้อน

จากรูปที่ 2.3 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่

$$\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \quad (2.3)$$

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p \quad (2.4)$$

โดยที่ θ_p คือมุมโพลาไรส์ (Polarizing Angle) เป็นมุมตกกระทบบน (ซึ่งเท่ากับมุมสะท้อน) ที่ทำให้เกิดการสะท้อนเป็นแสงโพลาไรส์ทั้งหมด และ θ_2 คือมุมหักเห

ใช้กฎของสเนลล์

แทนค่า $n_1=1$ (อากาศ) , $n_2 = n$ (วัสดุใดๆ)

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.5)$$

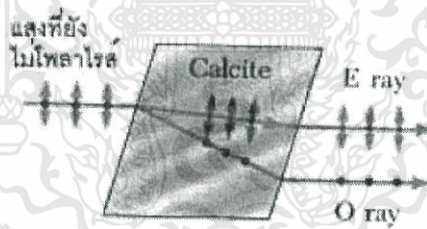
เรียกว่า Brewster's law สามารถใช้หาค่าดัชนีหักเหของวัสดุ โดยการวัดมุมโพลาไรส์ค่าเดียวเท่านั้น

$$\sin \theta_p = n \sin(90^\circ - \theta_p) = n \cos \theta_p \quad (2.6)$$

$$n = \tan \theta_p \quad (2.7)$$

2.1.1.3 โพลาไรส์โดยการหักเหซ้อน

วัสดุบางชนิดเช่น แคลไซต์หรือควอทซ์ มีคุณสมบัติที่เรียกว่า Birefringent คือมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า เนื่องจากแสงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เท่ากันในทิศทางของผลึก เมื่อนำแสงที่ไม่โพลาไรส์เข้าสู่ผลึกของวัสดุเหล่านี้ แสงที่หักเหออกมาจึงเป็นลำแสงโพลาไรส์ ดังรูปที่ 2.4

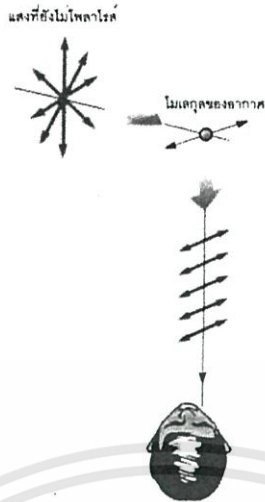


รูปที่ 2.4 โพลาไรส์โดยการหักเหซ้อนในผลึกแคลไซต์ทำให้ได้ลำแสง E Ray และ O Ray ที่โพลาไรส์ [7]

2.1.1.4 โพลาไรส์โดยการกระเจิง

เมื่อแสงที่ไม่โพลาไรส์เคลื่อนที่ผ่านกลุ่มอนุภาค เช่น ควันแสงแดดผ่านอากาศ จะเกิดปรากฏการณ์กระเจิง (Scattering) แสงที่กระเจิงจะโพลาไรส์บางส่วน

พิจารณา คลื่นแสงความยาวคลื่น λ ตกกระทบโมเลกุลก๊าซในอากาศขนาด d โดย $d \ll \lambda$ (โมเลกุลออกซิเจนและไนโตรเจนในบรรยากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับ 0.2 นาโนเมตร) เนื่องจากความเข้มแสงที่กระเจิงมีค่า



รูปที่ 2.5 การกระเจิงของแสงโดยโมเลกุลในอากาศ [7]

2.2 โฟโตอิลาสติกซิตี (photoelasticity) [2]

โฟโตอิลาสติกซิตี เป็นวิธีการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายความเค้นภายในชิ้นงานเหมาะสำหรับเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาจุดของความเค้นหลักด้วย โดยวิธีนี้จะแสดงริ้วสีของสนามความเค้นในชิ้นงาน

เมื่อรังสีของแสงโพลาไรส์ส่องผ่านวัสดุใส จะได้คลื่นแสงออกมาสองทิศทางที่ไม่เป็นโพลาไรส์ แต่เมื่อแสงผ่านแผ่นโพราลอยด์จะเกิดการหักเหเป็นคลื่นแสงโพลาไรส์ ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาเป็นคลื่นแสงที่มีดัชนีหักเห ความแตกต่างในดัชนีหักเหนำไปสู่การหน่วงเฟสระหว่างความสัมพันธ์ทั้งสองคลื่น ส่วนประกอบและค่าการหน่วงสามารถหาได้จาก stress optic สมการ 2.8

$$\sigma = \frac{R}{ct} \quad (2.8)$$

โดยที่

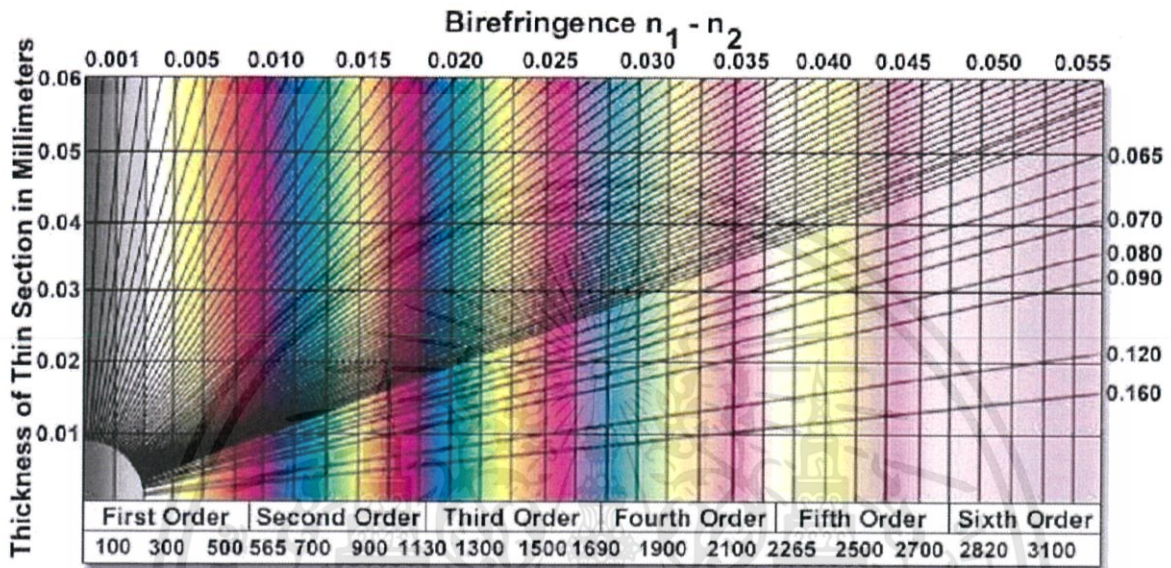
σ คือ ค่าความเค้น

R คือ ค่าการหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด (Retardation)

c คือ ค่า stress optic coefficient (มีค่าเท่ากับ 2.54)

t คือ ค่าความหนาของชิ้นงาน

จากวิธีโพโตอิลาสติกซีตีจะได้ริ้วสีที่แตกต่างไปตามค่าดัชนีการหักเหของแสง สามารถนำมาเปรียบเทียบกับแผนภูมิของริ้วสีดังรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.1 เพื่อหาค่าการหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด(Retardation) และนำไปวิเคราะห์หาค่าความเค้นตัก้างในวัสดุได้



รูปที่ 2.6 Michel-Levy interference color chart [6]

สำหรับการคำนวณค่าความเค้นตัก้างในชิ้นงาน สามารถนำริ้วสีของสนามความเค้นมาเทียบกับ Michel-Levy interference color chart ดังรูปที่ 2.6 แล้วนำสีที่ได้มาเทียบกับตารางค่าความหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด (Retardation) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด (Retardation) [6]

order	retardation (nm)	colour	order	retardation (nm)	colour	
I	0	Black	II	845	greenyellow	
	40	Dark grey		865	lightgreenyellow	
	100	Lavender grey		910	yellow	
	160	Greyish blue		950	orange	
	220	grey		1000	bright orange	
	235	Light green		1100	darkviolet	
	260	white		III	1130	lightviolet
	270	Whiteyellow			1150	blueviolet
	275	LightgoldenYellow			1260	greenblue
	280	khaki			1335	darkseagreen
	305	Light Yellow	1375		brightgreen	
	330	yellow	1425	greenyellow		
	430	buff	1495	darkred		
	505	orange	1535	orangered		
	535	red	1620	orchid		
550	Deep red	1650	greymagenta			
II	565	purple	IV	1680	greyblue	
	575	royalblue		1710	darkseagreen	
	590	mediumblue		1745	bluegreen	
	665	Sky-blue		1810	lightgreen	
	730	darkcyan		1930	palegreen	
	750	green		2010	whitegrey	
	825	lightgreen		2050	bright orange	

2.3 พลาสติก (Plastic) [8]

พลาสติก (Plastic) มาจากรากศัพท์ภาษากรีกว่า "plastikos" หมายความว่าหล่อ หรือหลอมเป็นรูปร่างได้ง่าย พลาสติกเป็นโพลิเมอร์ประเภทหนึ่งที่มีส่วนใหญ่นำมาจากการสังเคราะห์ขึ้น (Synthetic polymer) แต่ก็มีพลาสติกที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติเช่นกัน เช่น ชะลัดัก พลาสติกเป็นสารอินทรีย์ เป็นไฮโดรคาร์บอน มีไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก พลาสติกเป็นโพลิเมอร์ที่สามารถนำมาหล่อเป็นรูปร่างต่างๆตามแบบ โดยใช้ความร้อนและแรงอัดเพียงเล็กน้อย มีจุดหลอมเหลวระหว่าง 80-350 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกด้วย ปัจจุบันพลาสติก (plastic) มีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก เครื่องมือเครื่องใช้และวัสดุก่อสร้างหลายชนิดทำด้วยพลาสติก เช่น เครื่องใช้ในครัวเรือนจำพวกจานชาม ขวดโหลต่าง ๆ ของเล่นเด็ก วัสดุก่อสร้าง สีทาบ้าน กาวติดไม้และติดโลหะ อุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์การแพทย์ เป็นต้น เหตุที่พลาสติกเป็นที่นิยมเพราะมีราคาถูก มีน้ำหนักเบา ทนความชื้นได้ดี ไม่เป็นสนิม ทำให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการได้ง่ายกว่าโลหะ เป็นฉนวนไฟฟ้า มีทั้งชนิดโปร่งใสและมีสีต่าง ๆ กัน ด้วยเหตุนี้พลาสติกจึงใช้

แทนโลหะหรือวัสดุบางชนิด เช่น แก้ว ได้เป็นอย่างดี แต่พลาสติกก็มีข้อเสียหลายอย่างด้วยกันคือ ไม่แข็งแรง (รับแรงดึงแรงบิดและแรงเฉือนได้ต่ำมาก) ไม่ทนความร้อน (มีจุดหลอมเหลวต่ำ ติดไฟง่าย และไม่คงรูป จึงทำให้ขอบเขตการใช้งานของพลาสติกยังไม่กว้างเท่าที่ควร เทอร์โมพลาสติก วัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลงพลาสติกที่แข็งตัวแล้วสามารถนำมาหลอมซ้ำได้ด้วยความร้อน เทอร์โมพลาสติกจึงเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ด้วยเทคนิคพื้นฐานเช่น การฉีด การอัดรีด หรือปั่นเป็นเส้นใยนอกจากนี้ยังมีสมบัติที่นำมาหลอมใหม่และขึ้นรูปซ้ำได้ ทำให้เกิดประโยชน์จากการใช้เศษวัสดุหรือของเสียจากการผลิต โดยการนำเศษพลาสติกมาบดและผสมเข้ากับเรซินใหม่ อย่างไรก็ตาม ข้อควรระวังคือพลาสติกที่ผ่านกระบวนการที่มีความร้อนหลายครั้งสามารถเสื่อมสภาพ หรือทางเทคนิคเรียกว่า Degradation ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ควรใช้ผสมในสัดส่วนที่พอเหมาะเท่านั้น สำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทที่ต้องการสมบัติพิเศษ (ทางแสง) ควรระวังเรื่องความสะอาดของวัตถุดิบและสิ่งเจือปน เช่น เลนส์ไฟรถยนต์ การใช้วัสดุที่ผ่านกระบวนการผลิตมาแล้วอาจจะกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้มาก โพลีเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกอาจได้จากการสังเคราะห์แบบรวมตัว (addition) หรือควบแน่น condensation ซึ่งเป็นพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป ได้แก่ PE, PP, PET, nylon, และ PMMA เป็นต้น คือพลาสติกที่อ่อนตัว หรือหลอมละลายได้เมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อเย็นลง เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้หลายครั้ง ตัวอย่างพลาสติกประเภทนี้ ได้แก่พลาสติกในกลุ่ม: โพลีโอเลฟินส์ (Polyolefins) - LDPE, HDPE, PP - โพลีเอทิลีน (Polyethylene: PE) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แต่อากาศผ่านเข้าออกได้ มีลักษณะขุ่นและทนความร้อนได้พอควร เป็นพลาสติกที่นำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ถู ขวด แทนรองรับสินค้า - โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) เป็นพลาสติกที่ไอน้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย แข็งกว่าโพลีเอทิลีนทนต่อสารไขมันและความร้อนใช้ทำแผ่นพลาสติกถุงพลาสติกบรรจุอาหารที่ทนร้อน หลอดดูดพลาสติก เป็นต้น โพลิสไตรีน (Polystyrene) - PS, HIPS - PS มีลักษณะโปร่งใส เปราะ ทนต่อกรดและด่าง ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร ใช้ทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้สำนักงาน เป็นต้น อะครีโลไนไตรล์ - สไตรีน (Acrylonitrile-Styrene) - AS, SAN - SAN เป็นพลาสติกโปร่งใส ใช้ผลิตชิ้นส่วน เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น อะครีโลไนไตรล์-บิวทีไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) - ABS - ABS สมบัติคล้ายโพลิสไตรีน แต่ทนสารเคมีดีกว่า เหนียวกว่า โปร่งแสง ใช้ผลิตถ้วย ถาด เป็นต้น โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride)-PVC - PVC ไอน้ำและอากาศซึมผ่านได้พอควร แต่ป้องกันไขมันได้ดีมีลักษณะใส ใช้ทำขวดบรรจุน้ำมันและไขมันปรุงอาหาร ขวดบรรจุเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ เบียร์ ใช้ทำแผ่นพลาสติก ห่อเนยแข็ง ทำแผ่นแลมินเนตชั้นในของถุงพลาสติก ไนลอน(Nylon) เป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก คงทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิ ทำแผ่นแลมินเนตสำหรับทำถุงพลาสติกบรรจุอาหารแบบสูญญากาศ โพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate) เหนียวมากโปร่งใส ราคาแพง ใช้ทำแผ่นฟิล์มบาง ๆ บรรจุอาหาร โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate: PC) มีลักษณะโปร่งใส แข็ง ทนแรงยึดและแรงกระแทกได้ดี ทนความร้อนสูง ทนกรด แต่ไม่ทนด่าง เป็นรอยหรือคราบอาหาร จับยาก ใช้ทำถ้วย จาน ชาม ขวดนมเด็ก และขวดบรรจุอาหารเด็ก

2.4 ความเค้น (Stress) [8]

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติและความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน การหาค่าความเค้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.9

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.9)$$

เมื่อ

σ = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa, 1 Pa = 1N/m²) หรือ kgf/mm² หรือ psi (lb/in²)

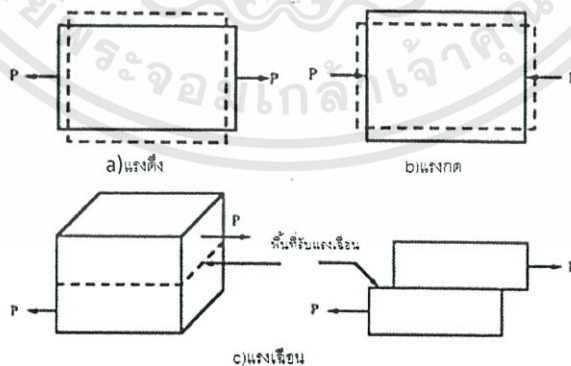
P = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N หรือ kgf หรือ lbf

A = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ : m² หรือ mm² หรือ in²

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.7a
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.7b
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.7c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน

ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดขึ้นมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆกัน



a) แรงดึง (Tension) b) แรงกด (Compression) C) แรงเฉือน (Shear)

รูปที่ 2.7 ลักษณะของแรงกระทำชนิดต่าง ๆ [9]

2.4.1 ความเค้นที่เกิดจากการฉีดพลาสติก [10]

ความเค้นตกค้าง คือ สิ่งที่ตกค้างอยู่ เป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิดความเค้นทั้งหมด (จากแรงภายนอก, จากการไม่สมดุลของความร้อน) ซึ่งต้องกำจัดออก เป็นความเค้นที่เหลืออยู่ระหว่างพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน แม้ว่าไม่มีความเค้นภายนอกมากระทำ ความเค้นคงเหลือเกิดขึ้นจากหลายเหตุผล รวมทั้งการไม่ยืดหยุ่นให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และผลจากการปรับปรุงด้วยความร้อน ความร้อนจากการเชื่อมเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานขยายตัวในวงจำกัด เช่นการเชื่อมแบบ หลอมละลาย หรือการจับยึดชิ้นงานระหว่างการเชื่อม เมื่อเนื้อรอยเชื่อมเกิดเย็นตัว บางพื้นที่เย็นก่อนและเกิดการหดตัวก่อน ส่วนอื่น ความเค้นตกค้างที่เหลืออยู่ คือสิ่งที่ได้จากการหลอม รวมทั้งการเย็นตัวของชิ้นงานที่ไม่สมดุลกัน ขณะที่ไม่สามารถควบคุมความเค้นตกค้างได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การออกแบบจำนวนมากขึ้นกับมัน ตัวอย่างเช่น ความแข็งแรงของกระจก และการเผื่อความเค้นล่งหน้าของคอนกรีต ความเค้นในคอนกรีต ขึ้นกับการป้องกันความเปราะ เสียหาย ให้ทำงานเดียวกัน ความโน้มเอียงสู่การเกิดโครงสร้างที่แข็งเปราะ (marensite) การก่อรูปแบบของความเค้นในมิตดาบโดยเจาะจงให้คมมีความแข็งแรง สามารถป้องกันการแตกที่คมดาบ บางอย่างเช่น ลากล่องปืน ทำด้วยท่อสองท่อให้ยึดติดกัน ท่อด้านในถูกบีบอัดขณะภายนอกทำให้ขยายออกได้ เพื่อป้องกันการแตกจากร่องที่เป็นเกลียวของลากล่อง เมื่อกระสุนพุ่งออกไป ปกติชิ้นส่วนทำให้ร้อนหรือจุ่มในของเหลวไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) เพื่อช่วยส่วนประกอบ การบีบอัดที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะทำการห่อหุ้มของการใช้ความเค้นตกค้าง สลักเกลียวพวงมาลัยของยานยนต์ ตัวอย่างเช่น การกดรูของดุมล้อ รูมีขนาดเล็กกว่าสลัก เพื่อต้องการอัดแรงผ่านสลักให้เกิดความเค้นตกค้าง ความเค้นตกค้างจะผูกติดเข้าด้วยกันกับชิ้นส่วน ตัวอย่างอื่นๆเช่นตะปู เป็นต้น

2.4.2 สนามความเค้น (Stress Field) [11]

สนามความเค้นเมื่อเทียบเคียงกับสนามแม่เหล็กหรือสนามความโน้มถ่วงแล้ว สนามความเค้น คือ อาณาบริเวณหนึ่งในตัวกลางที่ซึ่งความเค้นมีตัวตนและมีผลโดยตรงต่อปัจจัยนั้น วิธีการคำนวณหาค่าความเค้นในชิ้นส่วนของโครงสร้างด้วยสูตรความเค้นพื้นฐานต่างๆ เช่น ความเค้นดึงจาก ความเค้นเฉือน หรือความเค้นดัดเป็นการคำนวณหาค่าความเค้นนั้นเป็นการคำนวณเฉพาะจุดเท่านั้น (Point-wise Computation) อย่างไรก็ตาม ในสภาพความเป็นจริงนั้นความเค้นเป็นปริมาณที่มีความต่อเนื่อง ดังนั้น ความเค้นจึงต้องการอาณาบริเวณหนึ่งๆ และอาณาบริเวณที่ว่านี้ก็คือ สนามความเค้น (Stress Field)

โดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถมองเห็นสนามความเค้นได้ เว้นจะอาศัยวิธีการทดลองอันหนึ่งที่เรียกว่า สนามความเค้นโพโตอีลาสติกซิติ วิธีการทดลองนี้จะทำให้มองเห็นภาพของสนามความเค้นในรูปของริ้ว (fringe patterns) โดยที่รูปแบบของริ้วจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปร่างของตัวกลางและลักษณะการกระทำของภาระภายนอกต่อตัวกลางนั้น เนื่องจากว่า ความเค้นเป็นปริมาณเวกเตอร์ ความเค้นจึงมีทั้งขนาดและทิศทาง สนามขนาดของความเค้น เรียกว่า สนามไอโซโครมาติก (isochromatic field) ส่วนสนามทิศทาง เรียกว่า สนามไอโซคลินิก (isoclinic field)

สนามไอโซโครมาติก (Isochromatic foeld)

ไอโซโครมาติก คำว่า ไอโซ เป็นคำอุปสรรค ซึ่งมีความหมายว่า เท่ากัน ส่วน โครมาติก มีความหมายว่า ที่เกี่ยวกับสี ดังนั้น สนามไอโซโครมาติก จึงมีความหมายว่า สนามของริ้วสีที่มีค่าเท่ากัน[12] ในทางทฤษฎีของโฟโตรีลาสติคิตีนั้น ริ้วที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ค่าผลต่างของความเค้นหลัก(principal stress difference)ดังนั้น ความหมายที่แท้จริงของริ้วสีที่เท่ากันคือ ริ้วที่แสดงค่าผลต่างของความเค้นหลักที่เท่ากัน

เนื่องจากว่าสนามไอโซโครมาติก ถูกควบคุมด้วยด้วยตัวแปรสนามตัวหนึ่งคือ ตัวแปรไอโซโครมาติก (isochromatic parameter)โดยที่ตัวแปรนี้เป็นฟังก์ชันของขนาดแรงที่กระทำต่อวัตถุและความยาวคลื่นแสง ดังนั้นสนามขนาดความเค้นที่เกิดขึ้นก็จะเปลี่ยนไปตามปัจจัยทั้งสองรูปที่ 2.8แสดงสนามไอโซโครมาติกที่เกิดขึ้นในแบบจำลองประแจปากตาย ซึ่งถูกบันทึกไว้โดยอาศัยอุปกรณ์ทางแสงที่เรียกว่าโพลาไรสโคป โดยใช้แสงสีขาวเป็นแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากแสงสีขาวประกอบไปด้วยสีองค์ประกอบประมาณ 7 สี จึงเห็นสีต่างๆ ปรากฏขึ้นในแบบจำลองของประแจ ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ริ้วสีที่เกิดขึ้นจากความเค้นตกค้างภายในประแจปากตาย[11]

2.5 ระบบสี RGB[13]

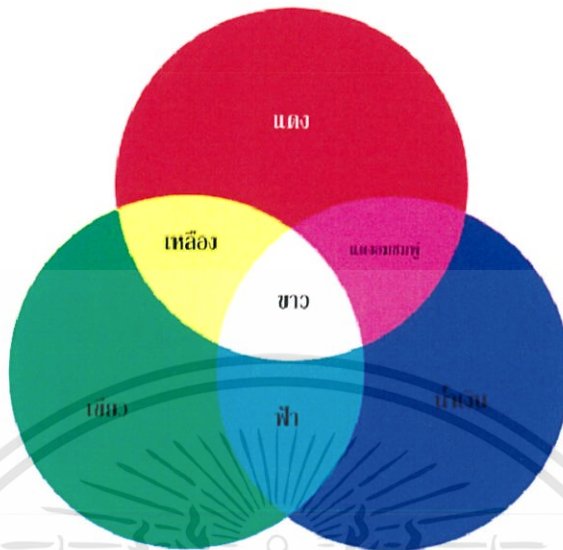
ระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสง เกิดจากการหักเหของแสงกลายเป็นสีรุ้ง ด้วยกัน 7 สี ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตาของคนเราสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงจะมีความถี่สูงสุดเรียกว่า อัลตราไวโอเรต และแสงสีแดงจะมีความถี่ต่ำสุด เรียกว่า อินฟราเรต แม้สีของแสงมีด้วยกัน 3 สี นั่นก็คือ สีแดง(R),สีเขียว(G),สีน้ำเงิน(B) และแต่ละแม่สีเมื่อรวมกันก็จะได้สีดังนี้

สีแดง+สีเขียว ได้ สีเหลืองYellow

สีเขียว+สีน้ำเงิน ได้ สีฟ้าCyan

สีแดง+สีน้ำเงิน ได้ สีแดงอมชมพูMagenta

และถ้ารวมสีของแสงทั้งหมดก็จะได้ สีขาวดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพวงจรสีของแสงแบบแม่สีและแม่สีรอง [13]

การมองเห็นของคนนั้นเกิดจากคลื่นแสงที่เกิดขึ้นในแหล่งแสงต่างๆวิ่งไปกระทบผิวและพื้นผิวอาจจะดูรับบางคลื่นแล้วสะท้อนกลับมากลายเป็นสีที่ตามองเห็น

ระบบสี RGB จะแสดงผลออกมาเป็นรูปแบบการรับแสงแสดงผลด้วยแสงที่เป็นแม่สีได้แก่ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆไม่ว่าจะเป็น จอภาพ,สแกนเนอร์,กล้องดิจิทัลหรือดวงตาคนเราล้วนแต่รับและแปลผลเป็นสีต่างๆด้วยแสงเหล่านี้เมื่อนำแม่สีของแสงทั้ง 3 มาผสมกัน ในปริมาณแสงสว่างเท่ากันก็จะได้เป็นแสงที่สีขาว แต่ถ้าผสมกันระหว่างแสงระดับความสว่างต่างกันก็จะได้ผลที่เป็นแสงสีๆมากมายเป็นล้านสีทีเดียว

ในระบบสี RGB นั้น ไม่ได้หมายถึงสีใดสีหนึ่ง แต่เป็นการรวมกันของแม่สีทั้ง 3 ซึ่ง อธิบายถึงหลักของสี RGB โดยเป็นพื้นฐานของการนำเอาสี RGB ไปใช้ในระบบของสี RGB หรือ Adobe RGB

2.6. โมเมนต์ของแรง [14]

โมเมนต์ของแรง (moment of force) หรือโมเมนต์ (moment) หมายถึง ผลของแรงที่กระทำต่อวัตถุ เพื่อให้วัตถุหมุนไปรอบจุดหมุน ดังนั้น โมเมนต์ของแรงก็คือ ผลคูณของแรงกับระยะตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุน ดังสูตร

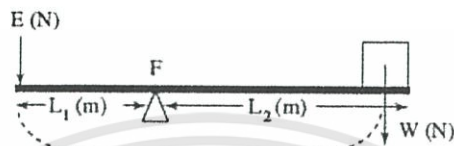
2.11

$$\text{โมเมนต์} = \text{แรง} \times \text{ระยะตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุน} \quad (2.11)$$

ทิศทางของโมเมนต์ มี 2 ทิศทาง คือ

1. โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา
2. โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

แนวทิศทางของโมเมนต์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ทิศทางของโมเมนต์ [14]

จากรูปที่ 2.10 โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา = $W \times L_2$ (นิวตัน-เมตร)

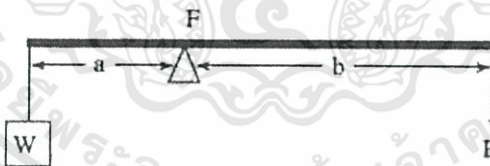
โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา = $E \times L_1$ (นิวตัน-เมตร)

ถ้ามีแรงหลายแรงกระทำต่อวัตถุชิ้นหนึ่ง แล้วทำให้วัตถุนั้นอยู่ในสภาวะสมดุลจะได้ว่า

ผลรวมของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา = ผลรวมของโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

2.6.1 คาน [15]

หลักการของโมเมนต์ นำมาใช้กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า คาน (lever) หรือคานดีดคานจัด คานเป็นเครื่องกลชนิดหนึ่งที่ใช้ติดตั้งวัตถุให้เคลื่อนที่รอบจุดหมุน (fulcrum) มีลักษณะเป็นแท่งยาว หลักการทำงานของคานใช้หลักของโมเมนต์



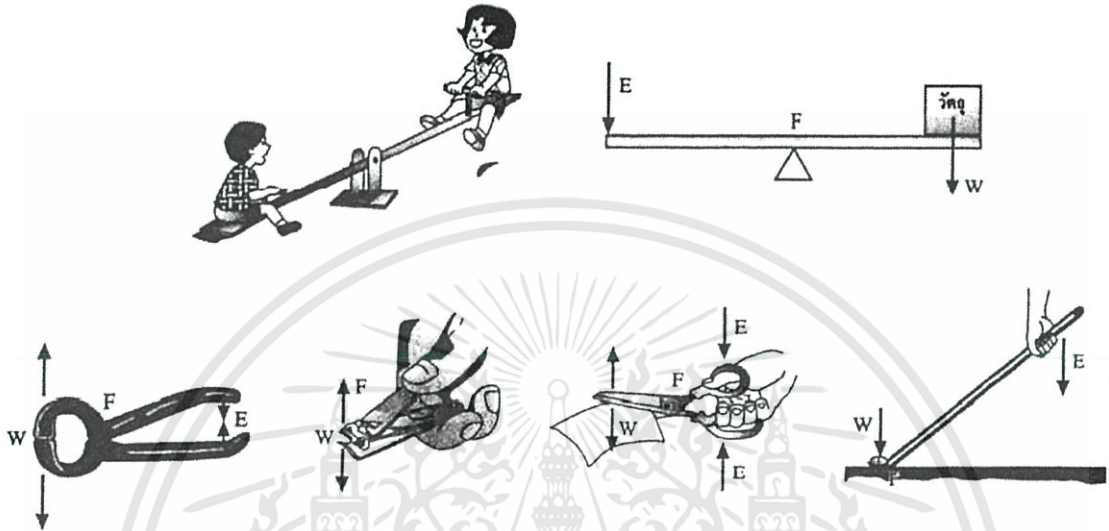
รูปที่ 2.11 ลักษณะของคาน [14]

จากรูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของคาน ส่วนประกอบที่สำคัญในการทำงานของคานมี 3 ส่วน คือ

1. จุดหมุนหรือจุดพิลกรัม (Fulcrum) F
2. แรงความต้านทาน (W) หรือน้ำหนักของวัตถุ
3. แรงความพยายาม (E) หรือแรงที่กระทำต่อคาน

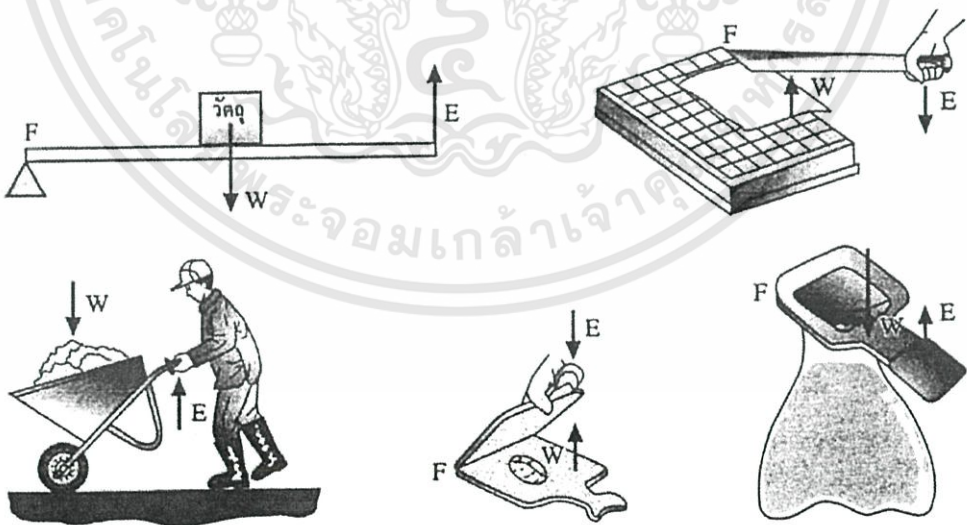
การจำแนกคาน คานจำแนกได้ 3 ประเภทหรือ 3 อันดับดังนี้

1. คานอันดับที่ 1 เป็นคานที่มีจุด (F) อยู่ระหว่างแรงความพยายาม (E) และแรงความต้านทาน (W) เช่น กรรไกรตัดผ้า กรรไกรตัดเล็บ คีมตัดลวด เรือแจว ไม้กระดก เป็นต้น ดังรูปที่ 2.12



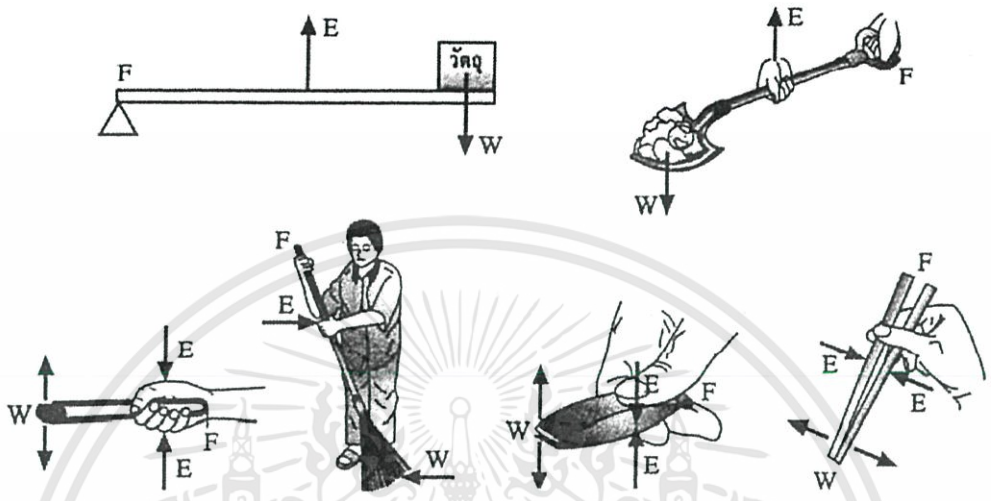
รูปที่ 2.12 คานอันดับ 1 [14]

2. คานอันดับ 2 เป็นคานที่มีแรงความต้านทาน (W) อยู่ระหว่างแรงความพยายาม (E) และจุดหมุน (F) เช่น ที่เปิดขวดน้ำอัดลม รถเข็นทราย ที่ตัดกระดาษ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 คานอันดับ 2 [14]

3. คานอันดับที่ 3 เป็นคานที่มีแรงความพยายาม (E) อยู่ระหว่างแรงความต้านทาน (W) และจุดหมุน (F) เช่น ตะเกียบ คีมคีบถ่าน แหนบ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.14

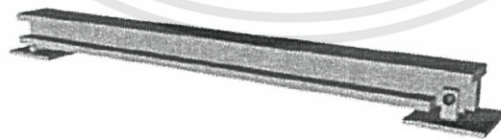


รูปที่ 2.14 คานอันดับ 3 [14]

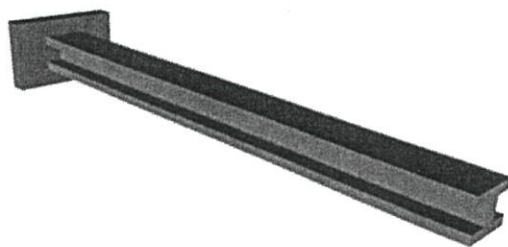
2.6.2 ประเภทของคาน [15]

2.6.2.1 คานประเภทดีเทอร์มิเนต (Determinate Beam)

เป็นคานที่สามารถหาค่าแรงปฏิกิริยาที่ไม่รู้ค่าได้โดยการใช้สมการของการสมดุลย์ ($\Sigma M = 0$ และ $\Sigma F_y = 0$) ก็สามารถหาค่าได้ซึ่งคานประเภทนี้ ได้แก่ คานที่จุดรองรับแบบง่าย (Simple Support) คานปลายยื่น (Cantilever Beam) และคานแขวน(Overhanging Beam) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15(ก.) คานที่จุดรองรับแบบง่าย (Simple Support) [14]



รูปที่ 2.15(ข.) คานปลายยื่น (Cantilever Beam) [14]



รูปที่ 2.15(ค.) คานแขวน (Overhanging Beam) [14]

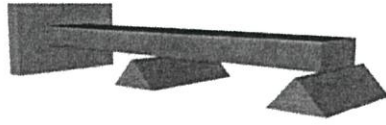
รูปที่ 2.15 คานประเภทดีเทอร์มิเนต

2.6.2.2 คานประเภทอินดีเทอร์มิเนต (Indeterminate Beam) [15]

เป็นคานประเภทที่เราไม่สามารถหาค่าแรงปฏิกิริยาของคานได้ จากการใช้สมการของการสมดุลย์ แต่สามารถหาได้จากการใช้ทฤษฎีของสามโมเมนต์ (Three Moment) หรือใช้วิธีการหาแรงปฏิกิริยาจากค่าของระยะโค้งและมุมลาดชันของคานแล้วนำไปสู่ค่าของแรงปฏิกิริยาของคาน ซึ่งคานประเภทนี้ ได้แก่ คานที่มีจุดยึดทั้งสองข้าง (Double End Fixed)หรือ คานปลายยื่นแต่มีจุดรับที่ปลายยื่น (Restrained Beam) และคานต่อเนื่อง (Continuous Beam) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16(ก.) คานปลายยื่นแต่มีจุดรับที่ปลายยื่น (Restrained Beam) [14]



รูปที่ 2.16(ข.) คานปลายยื่นแต่มีจุดรับที่ปลาย 2 จุด (Restrained Beam) [14]



รูปที่ 2.16(ค.) คานต่อเนื่อง (Continuous Beam) [14]



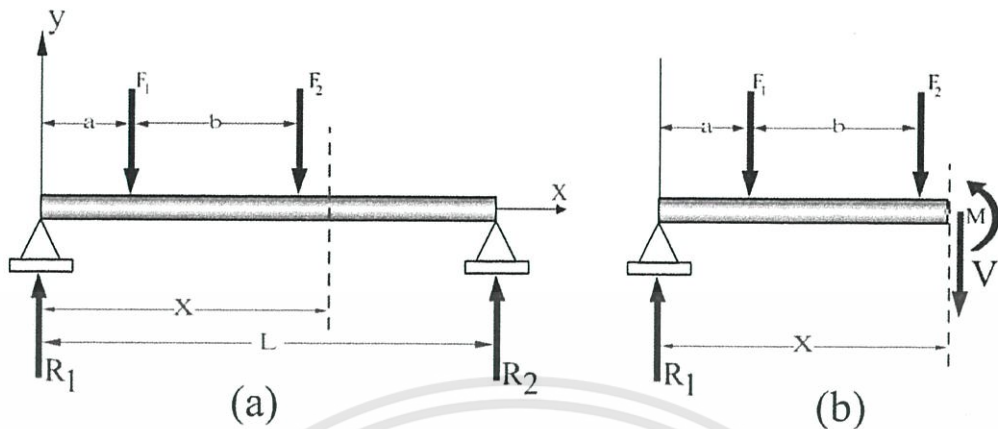
รูปที่ 2.16(ง.) คานที่มีจุดยึดทั้งสองข้าง (Double End Fixed) [14]

รูปที่ 2.16 คานประเภทอินดีเทอร์มิเนต (Indeterminate Beam)

2.6.3 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดภายในคาน [15]

แรงเฉือน (Shearing Force) คือ ผลรวมทางพีชคณิตของแรงกระทำภายนอกผ่านจุดศูนย์ถ่วงที่หน้าตัดใดๆ ของคาน(ระยะ X) จากปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ V แทนแรงเฉือน

โมเมนต์ดัด (Bending Moment) คือ ผลรวมโมเมนต์ทางพีชคณิตของแรงภายนอกรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์ถ่วงในระนาบที่หน้าตัดใดๆ ของคานจากปลายคานด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ M แทนโมเมนต์ดัด ดังรูปที่ 2.17



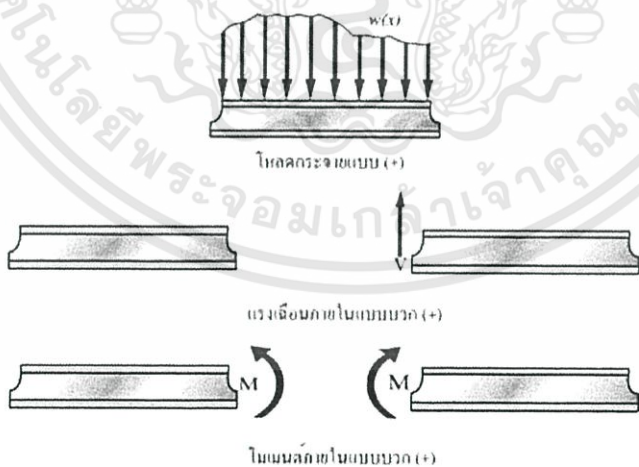
รูปที่ 2.17 ผลรวมทางพีชคณิตที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางถ่วงที่หน้าตัดใด ๆ ของคาน [14]

การที่จะเลือกคิดแรงบนด้านใดของภาคตัดนั้นขึ้นอยู่กับความสะดวกแต่ไม่ว่าจะคิดจากด้านใดค่าที่ได้จะต้องเท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะใช้วิธีการวิเคราะห์จากทางซ้ายมือเป็นหลัก

การกำหนดเครื่องหมายของภาระที่กระทำต่อคาน

การกำหนดเครื่องหมายของภาระที่กระทำต่อคานสามารถทำได้ดังนี้

1. ภาระที่กระจายลงบนคานเรากำหนดให้เป็นบวก
2. แรงเฉือนภายในของหน้าตัดคาน ที่ทำให้แรงเฉือนเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวก
3. โมเมนต์ภายในที่ทำให้คานโก่งลงมีค่าเป็นบวก ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การกำหนดเครื่องหมายของภาระที่กระทำต่อคาน [14]

ไดอะแกรมของแรงเฉือนและไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด

1. ไดอะแกรมของแรงเฉือน (Shearing Force Diagram) เขียนย่อว่า SFD

คือ แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับความยาวของคาน โดยมีจุดซ้ายมือของคานเป็นจุดเริ่มต้น ค่าทางแกน X จะเป็นระยะที่วัดไปตามความยาวของคานนั้น ตั้งแต่ทางด้านซ้ายมือจนถึงทางด้านขวามือสุดของคานนั้น และค่าทางแกน Y จะเป็นค่าของแรงเฉือนในแนวตั้งที่หน้าตัดใด ๆ ของคานนั้น

2. ไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram) เขียนย่อว่า BMD

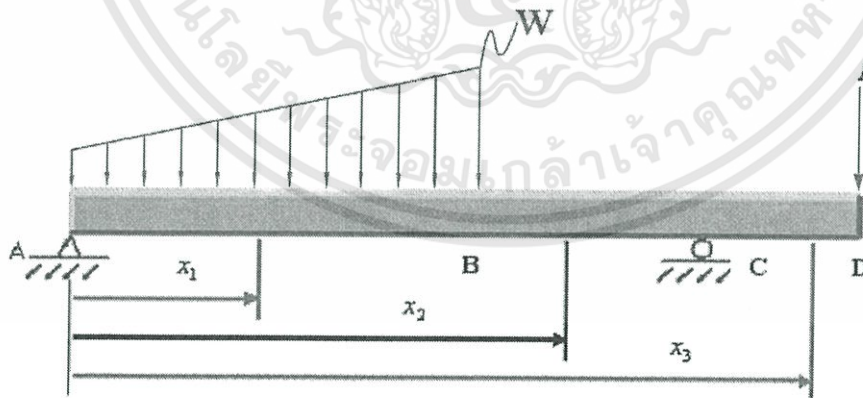
คือ แผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดกับความยาวของคาน โดยมีจุดซ้ายมือสุดของคานเป็นจุดเริ่มต้น ค่าทางแกน X จะเป็นระยะที่วัดไปตามความยาวของคานนั้น ตั้งแต่ทางด้านซ้ายมือจนถึงทางด้านขวามือสุดของคานนั้น และค่าทางแกน Y จะเป็นค่าของโมเมนต์ดัดที่หน้าตัดใด ๆ ของคานนั้น

ขั้นตอนการวิเคราะห์

เนื่องจากคานจะถูกพิจารณาในชั้นส่วนของโครงสร้างว่ามีความสำคัญมาก ยกตัวอย่างเช่น ข้อต่อยานยนต์ ชั้นส่วนที่ใช้รองรับพื้นขององค์อาคาร พื้นของสะพาน ส่วนปีกของเครื่องบิน เป็นต้น เมื่อคานเหล่านั้น มีแรงหรือภาระมากระทำ จะทำให้คานเกิดแรงเฉือนภายในและโมเมนต์ดัด โดยทั่วไปแล้วจะแปรค่าไปตามแนวแกนของคาน ในการออกแบบโครงสร้างจำเป็นต้องมีการหาแรงเฉือนและโมเมนต์มากที่สุดภายในคาน วิธีการหาในชุดฝึกอบรมการตัดด้วยระบบฝึกตามความสามารถนี้ จะใช้วิธีการแสดง V และ M เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x ใดๆ ตามแนวแกนของคาน ฟังก์ชันของแรงเฉือนและฟังก์ชันของโมเมนต์ดัดนี้สามารถวาดและแทนโดยกราฟที่เรียกว่า

- ไดอะแกรมแรงเฉือน (Shear Force Diagram)
- ไดอะแกรมโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram)

ซึ่งความหมายของผังแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6 เพื่อความเข้าใจจะใช้รูปประกอบการอธิบายดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 คานเกิดแรงเฉือนภายในและโมเมนต์ดัด [14]

การทำแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคาน จะใช้วิธีภาคตัด (Section) เพื่อหาแรงเฉือน V และโมเมนต์ดัด M ณ จุดที่ต้องการทราบ โดยกำหนดภาคตัดที่ระยะ x ใดๆ จะเริ่มคิดจากด้านซ้ายมือของคาน

อย่างไรก็ตามฟังก์ชันแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดที่ได้จะเป็นฟังก์ชันของ x ซึ่งเป็นแบบไม่ต่อเนื่องกัน หรือมีความชันในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องกัน ฉะนั้น ฟังก์ชันแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดจะหาโดยการแบ่งออกตามแนวแกนของคาน ระยะ x_1 , x_2 และ x_3 เพื่อที่จะใช้อธิบายการแปรค่าของ V และ M ตลอดความยาวคาน ระยะดังกล่าวนี้จะใช้ได้เฉพาะในขอบเขตดังนี้

$$A \rightarrow B \text{ คือ } x_1$$

$$B \rightarrow C \text{ คือ } x_2$$

$$C \rightarrow D \text{ คือ } x_3$$

โดยทั่วไปแล้ว ตำแหน่งรับแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นดังนี้

ตำแหน่งรับแรงเฉือนสูงสุดในการหาค่าและตำแหน่งของแรงเฉือนสูงสุดนั้นจะต้องสร้างไดอะแกรมของแรงเฉือน ทั้งนี้เพราะไม่มีวิธีที่จะบอกได้ว่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นจะเกิด ณ ที่ใดของคาน แต่โดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นที่บริเวณจุดรองรับของคานเป็นส่วนใหญ่

ตำแหน่งรับโมเมนต์ดัดสูงสุด ในการที่จะหาความเค้นดัดในคานจำเป็นที่จะต้องใช้ค่าโมเมนต์ดัดที่มีขนาดสูงสุด (ค่าเป็นบวกหรือลบมากที่สุด) ตำแหน่งที่ขนาดของโมเมนต์ดัดสูงสุด อาจหาได้โดยใช้ข้อสังเกตดังต่อไปนี้

1. ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีค่าของแรงเฉือนเปลี่ยนจากบวกมาเป็นลบ
2. ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่มีค่าของแรงเฉือนเปลี่ยนจากลบมาเป็นบวก
3. ในกรณีที่สมการของโมเมนต์ดัดเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของ x ตลอดทั้งคาน ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและ

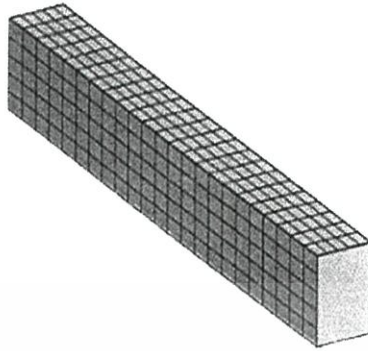
โมเมนต์ดัดต่ำสุดจะเกิดเมื่อ $V = 0$ $\left[\frac{dM}{dx} = 0 \right]$

4. ในกรณีที่มีแรงกระทำเป็นจุดอยู่ด้วยขนาดสูงสุดของโมเมนต์ดัดจะเกิดขึ้น ณ ที่ใดที่หนึ่งของแรงที่กระทำเป็นจุด ทั้งนี้ยกเว้นคานแบบยื่น
5. ขนาดสูงสุดของโมเมนต์ดัดในคานแบบยื่น จะเกิดที่ปลายของคานซึ่งถูกยึดแน่น

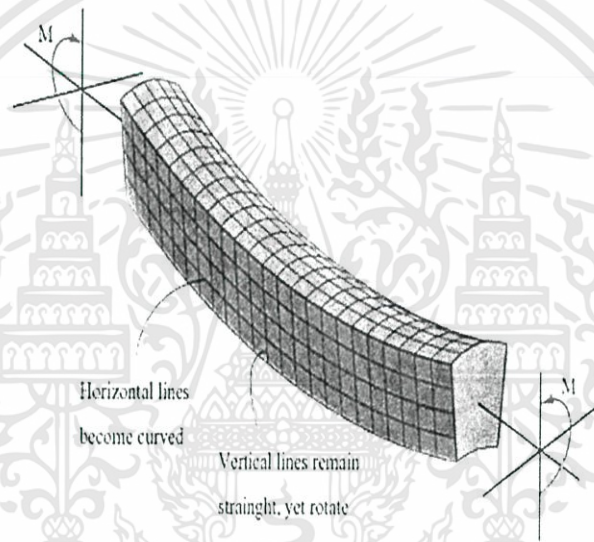
2.6.4 ความเค้นดัด (Bending Stress)

หลังจากที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหาตำแหน่งที่เกิด แรงเฉือน โมเมนต์ดัดสูงสุด ต่อไปจะนำค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดมาใช้ในการคำนวณหาความเค้นดัด (Bending Stress) ซึ่งเป็นความเค้นที่อยู่ในประเภทของความเค้นปกติ (Normal Stress) และเป็นได้ทั้งความเค้นดึงและความเค้นอัด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนหน้าตัด

ถ้ายังขั้นหนึ่งมีภาคตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านำมาตัดงอด้วยมือจะเห็นได้ว่าทางด้านหนึ่งยืดออก นั่นคืออยู่ภายใต้การดึง และด้านตรงข้ามอยู่ภายใต้แรงกด ผลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนด้วยการขีดเส้นเป็นตารางขนาดเท่ากับกับผิวด้านข้างของยางในแนวตั้งฉากกับแกนของแท่งยาง ดังรูป 2.20(a) เมื่อนำยางมาตัดงอจะเห็นได้ว่าขนาดของตารางมีการเปลี่ยนแปลงไปคือ ด้านหนึ่งมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนอีกข้างหนึ่งมีขนาดลดลงดังรูป 2.20(b) การเปลี่ยนแปลงขนาดของตารางเป็นการแสดงถึงการเกิดความเครียดและความเค้นที่พื้นผิวที่ตัดงอ



รูปที่ 2.20(a) ก่อนการเปลี่ยนรูป (Before Deform) [14]



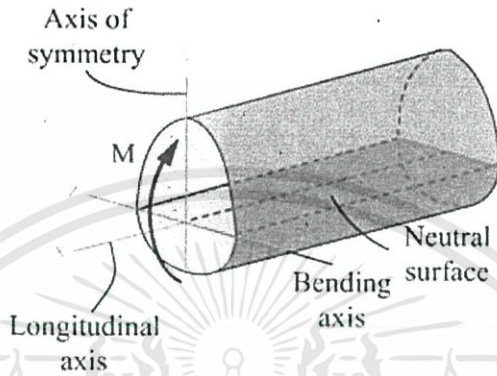
รูปที่ 2.20(b) หลังการเปลี่ยนรูป (After Deform) [14]

ข้อสมมติฐานที่ใช้ในการหาค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นในคาน

1. แรงทุกแรงกระทำอยู่บนระนาบเดียวกัน ตามแนวยาวของคาน และระนาบนี้ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของหน้าตัดคาน
2. ก่อนที่จะมีแรงมากระทำกับคานนั้น คานจะต้องมีลักษณะตรงอยู่เสมอตลอดคาน
3. คานที่ใช้จะต้องทำจากวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งคาน
4. ความเค้นที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความยืดหยุ่น (Elastic Limit)
5. ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากันทั้งการดึงและการกด
6. ระนาบของหน้าตัดยังคงเป็นระนาบก่อนและหลังการดัด
7. ความโค้งของคานที่เกิดขึ้นจะต้องมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของคานนั้น
8. ผลรวมของแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับหน้าตัดต้องเท่ากับศูนย์

2.6.4.1 การเปลี่ยนรูปการดัดของคานตรง (Bending Deformation of a Straight Member)

พิจารณาการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นเมื่อคานเป็นรูปปริซึมตรง ทำจากวัสดุที่มีลักษณะเป็น Homogeneous และถูกดัด ในที่นี้กำหนดให้คานมีพื้นที่หน้าตัดสมมาตรในแนวตั้งเมื่อเทียบกับแกนหลักและโมเมนต์ดัดจะถูกใส่เข้าไปให้หมุนรอบกับแกนดัดในแนวนอน ดังรูป 2.21 (a)



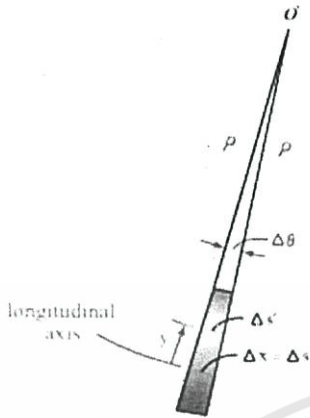
รูปที่ 2.21(a) เกิดขึ้นเมื่อคานเป็นรูปปริซึมตรง [14]



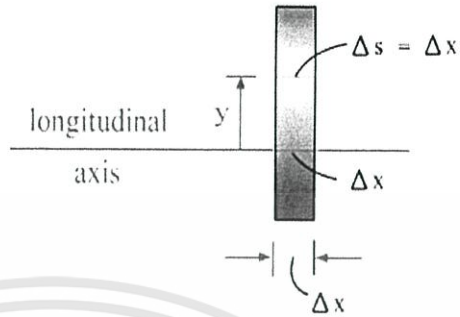
รูปที่ 2.21(b) คานก่อนรับการดัด [14]

รูปที่ 2.21(c) คานหลังรับการดัด [14]

เมื่อรูปปริซึมตรงถูกโมเมนต์ดัดกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนรูปดังรูป 2.21(c) เพื่อที่จะแสดงค่าการเปลี่ยนรูป ซึ่งจะเกิดความเครียดของวัสดุในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal) จะแยกส่วน (Segment) ของคานที่มีระยะยาว x โดยพิจารณาเพียงความยาว Dx จากรูป 2.21(d) และรูป 2.21(e) เกิดการเปลี่ยนรูป Ds กลายเป็น Ds' (หลังจากการเปลี่ยน)



รูปที่ 2.21(d) การไม่เปลี่ยนรูป [14]



รูปที่ 2.21(e) การเปลี่ยนรูป [14]

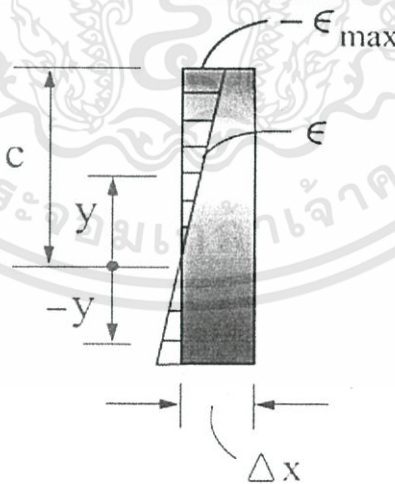
$$\therefore \epsilon = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s}$$

จากรูป 2.2(d) และรูป 2.2(e) จะได้ค่า $\Delta s' = (\rho - y)\Delta\theta$ และ $\Delta s = \rho\Delta\theta$ แทนค่าได้ดังนี้

$$\therefore \epsilon = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{(\rho - y)\Delta\theta - \rho\Delta\theta}{\rho\Delta\theta}$$

$$\therefore \epsilon = -\frac{y}{\rho}$$

(2.12)



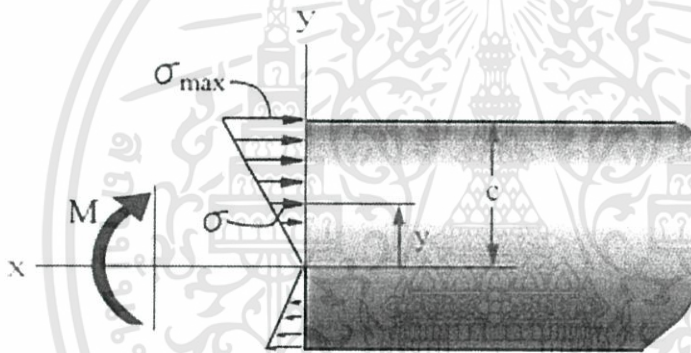
รูปที่ 2.21(f) การกระจายความเครียดปกติบนหน้าตัด [14]

จากรูป 2.21(f) เป็นการกระจายความเครียดปกติบนหน้าตัด ณ ตำแหน่งระยะ C ซึ่งเป็นระยะห่างไกลที่สุดจากจุดศูนย์กลาง (ซึ่งตำแหน่งนี้เป็นจุดที่แกนสะเทินถูกลากผ่าน) ค่าความเครียดปกติสูงสุดหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \therefore \epsilon_{max} &= \frac{c}{\rho} \\ \therefore \frac{\epsilon}{\epsilon_{max}} &= -\frac{y/\rho}{c/\rho} \end{aligned}$$

ดังนั้น
$$\epsilon = -\frac{y}{C} \epsilon_{max} \quad (2.13)$$

สูตรของการดัด (The Flexure Bending Formula)



รูปที่ 2.22 การหาสูตรการดัด[3]

พิจารณาจากรูป 2.22

จาก
$$\epsilon = -\frac{y}{C} \epsilon_{max}$$

จาก Hooke's Law; $\sigma = E\epsilon$ หรือ $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ หรือ $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$

$$\therefore \sigma = -\frac{y}{C} (\sigma_{max}) \quad (2.14)$$

พิจารณาจากรูป 2.23 แรงลัพธ์บนหน้าตัดมีค่าดังนี้

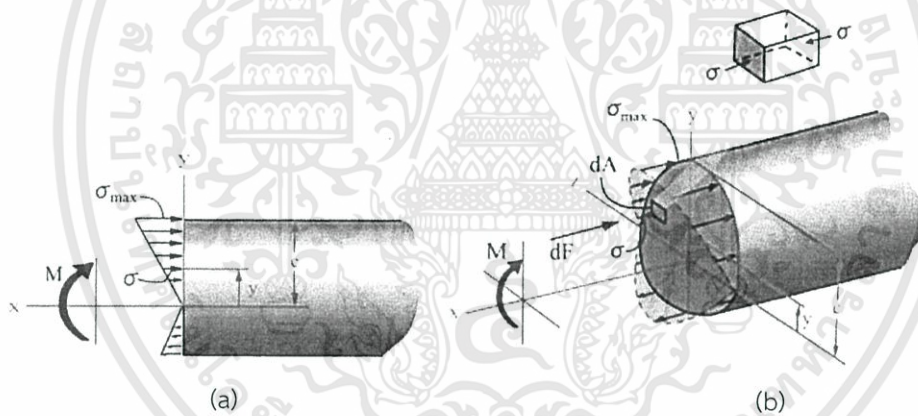
$$F_R = \sum F_x$$

$$\int_A dF = 0$$

$$\int_A \sigma dA = 0$$

$$-\frac{\sigma_{max}}{c} \int_A y dA = 0$$

เนื่องจากค่าของ $\frac{\sigma_{max}}{c}$ จะต้องไม่เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น ค่าที่เท่ากับศูนย์ คือ $\int_A y dA = 0$ ในอีกนัยหนึ่งโมเมนต์แรกของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน (Neutral axis) ต้องเป็นศูนย์ สภาพนี้ถ้าแกนสะเทิน คือ แกนศูนย์ถ่วงหรือแกนตัดในแนวนอนสำหรับพื้นที่หน้าตัด และต้องหาค่าพื้นที่หน้าตัด โดยต้องรู้ตำแหน่งของแกนสะเทิน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของความเค้นในคานอันนำไปสู่ผลลัพธ์ของโมเมนต์ภายใน M ที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด โมเมนต์นี้จะมีค่าเท่ากับโมเมนต์กระจายรอบแกนสะเทินโมเมนต์ของแรง dF รอบแกนสะเทิน คือ $dM = ydF$ ดังรูป 2.23 ในที่นี้ค่าโมเมนต์มีค่าเป็นบวก เนื่องจากใช้กฎมือขวา ทิศทางไปทางบวกของแกน z เนื่องจาก $dF = \sigma dA$ เมื่อ y เป็นบวก และ σ มีค่าเป็นลบ (อัด) จะได้ $(M_R)_z$ เท่ากับโมเมนต์ลัพธ์รอบแกน z เพราะฉะนั้น $(M_R)_z$ เท่ากับ $\sum M_z$ ฉะนั้น โมเมนต์ลัพธ์รอบแกน z หาค่าได้ดังนี้



รูปที่ 2.23 การแปรเปลี่ยนความเค้นดัด [3]

$$M = \int_A y dF$$

$$M = \int_A y(-\sigma dA)$$

$$M = \int_A y\left(\frac{y}{c} \sigma_{max}\right) dA$$

$$M = \frac{\sigma_{max}}{c} \int_A y^2 (dA)$$

\therefore

$$\sigma_{max} = \frac{MC}{I}$$

(2.15)

[ในที่นี้ค่าของ $\int_A y^2 da$ แทนด้วยค่า I]

กำหนดให้	σ_{max}	คือความเค้นปกติสูงสุดจากการดัดในคานที่เกิดขึ้นบนพื้นที่หน้าตัด ณ ตำแหน่งที่ไกลที่สุดจากแกนสะเทิน
	M	คือ โมเมนต์ลัพท์ภายใน หาจากพื้นที่หน้าตัด และใช้สมการการสมมูล โดยคำนวณรอบแกนสะเทินของหน้าตัด
	I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดคำนวณรอบแกนสะเทิน
	C	คือ ระยะตั้งฉากจากแกนสะเทิน ถึงจุดไกลที่สุดจากแกนสะเทินระยะ c ที่ไกลที่สุดเป็นตำแหน่งที่ σ_{max} กระทำ

จาก

$$\sigma_{max} = \frac{MC}{I}$$

$$\frac{\sigma_{max}}{C} = \frac{M}{I}$$

จากสมการของ

$$\sigma = -\frac{y}{C} (\sigma_{max})$$

\therefore จะได้ว่า

$$\sigma = -\frac{My}{I} \tag{2.16}$$

หมายเหตุ เครื่องหมายลบเกิดจากตั้งแกน x, y, z โดยใช้กฎมือขวา M มีค่าเป็นบวกตลอดแกน z และแกน y ทิศทางขึ้นเป็นบวก ทำให้ σ เป็นลบเนื่องจาก σ กระทำทิศทางตรงข้ามกับแกน x ที่เราตั้งไว้

จากสมการที่ (2.17) อัตราส่วน I/C ขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตของหน้าตัดขวางของคาน อัตราส่วน I/C นี้เรียกว่า “โมดูลัสหน้าตัด (Section Modulus)” ของคาน

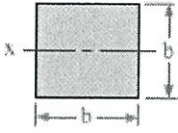
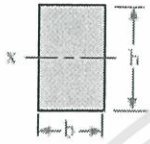
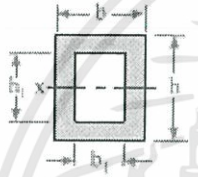
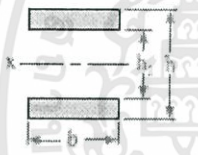
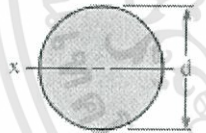
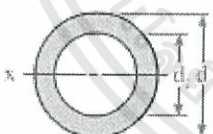
$$M = \sigma_{max} \frac{I}{C} \tag{2.17}$$

จากสมการ (2.17) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\sigma_{max} = \frac{M}{Z} \tag{2.18}$$

ในสมการที่ (2.18) พบว่าความเค้นดัดสูงสุด σ_{max} เป็นปฏิภาคกลับโมดูลัสหน้าตัด ดังนั้นการออกแบบคานในทางปฏิบัติแล้วจะกำหนดให้ใช้ช่วงค่าโมดูลัสหน้าตัดที่มีค่าสูง ๆ

ตารางที่ 2.2 โมเมนต์ความเฉื่อย และโมดูลัสพื้นที่หน้าตัด ของรูปพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ [14]

รูปพื้นที่หน้าตัด	โมเมนต์ของความเฉื่อย (I)	โมดูลัสพื้นที่หน้าตัด (Z)
	$I_x = \frac{b^4}{12}$	$Z = \frac{b^3}{6}$
	$I_x = \frac{bh^3}{12}$	$Z = \frac{bh^2}{6}$
	$I_x = \frac{bh^3 - b_1h_1^3}{12}$	$Z = \frac{bh^3 - b_1h_1^3}{6h}$
	$I_x = \frac{b(h^3 - h_1^3)}{12}$	$Z = \frac{b(h^3 - h_1^3)}{6h}$
	$I_x = \frac{\pi d^4}{12}$	$Z = \frac{\pi d^3}{32}$
	$I_x = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{12}$	$Z = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{32d}$

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. หาค่าโมเมนต์ภายใน

ทำการตัดหน้าตัดส่วนที่ตั้งฉากกับความยาวของเพลหรือคาน (Longitudinal Axis) ณ ตำแหน่งที่ซึ่งเกิดการตัด หรือเกิดความเค้นปกติค่าของผลลัพธ์โมเมนต์ภายในที่ได้รับจากการตัดหน้าตัด สำหรับจุดประสงค์นี้ แกนศูนย์ถ่วง และ/หรือแกนสะเทิน สำหรับหน้าตัดต้องรู้ค่า เพราะว่า ค่า M ต้องคำนวณรอบแกนนี้และค่าความเค้นดัดสูงสุดสามารถหาค่าได้จากไดอะแกรมโมเมนต์ดัด

2. โมเมนต์ความเฉื่อย

คำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนสะเทิน

3. ความเค้นดัด

ระยะวัดทาง y วัดตั้งฉากกับแกนสะเทิน ถึงจุดที่ความเค้นกระทำ โดยหาค่า σ จากสมการ

$$\sigma = -\frac{My}{I}$$

หรือ

$$\sigma_{max} = \frac{MC}{I} \quad (2.19)$$

2.6.4.2 การดัดของคานที่มีหน้าตัดไม่สมมาตร (Unsymmetric Bending)

การหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนที่ต้องการหาโมเมนต์ดัด ในกรณีที่หน้าตัดของคานไม่เป็นตามที่กล่าวมาแล้ว เช่น เป็นรูปตัว T การหาโมเมนต์ของคานของความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของหน้าตัดคานเหล่านั้น ต้องอาศัยหลักการย้ายแกนของโมเมนต์ของความเฉื่อยกล่าวคือโมเมนต์ของความเฉื่อยของรูปตัดรอบแกนใดแกนหนึ่งที่ขนานกับแกนสะเทินจะมีค่าเท่ากับโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของรูปนั้น บวกด้วยผลคูณของพื้นที่หน้าตัดกับกำลังสองของระยะทางที่แกนนั้นห่างจากแกนสะเทินดังสมการต่อไปนี้

$$I_{NA} = I_{CG} + Ad^2 \quad (2.20)$$

- เมื่อ
- I_{NA} เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนที่ต้องการหาโมเมนต์ดัด
 - I_{CG} เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของหน้าตัดนั้น
 - A เป็นพื้นที่หน้าตัดของคาน
 - d เป็นระยะทางที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางไปยังแกนที่ต้องการหา

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลอง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย การสร้างเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง, การศึกษาและเขียนโปรแกรม Matlab และการทดสอบเครื่องและโปรแกรมโดยทดลองถ่ายภาพจากเครื่องตรวจสอบความเค้นและนำภาพที่ได้วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Matlab ที่เขียนขึ้นในการช่วยวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของความเค้นที่ได้

3.1 การออกแบบเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการดำเนินการสร้างเครื่องตรวจสอบความเค้น ซึ่งประกอบด้วย การออกแบบเครื่อง วัสดุที่ใช้สร้างเครื่อง และส่วนประกอบที่จะนำเข้ามาประกอบกับเครื่อง

3.1.1 การออกแบบเครื่อง

การออกแบบเครื่องตรวจสอบความเค้น เลือกใช้โปรแกรม SOLIDWORK 2010 ในการช่วยออกแบบ โดยในการออกแบบได้คำนึงถึงความทนทาน ความยืดหยุ่นในการใช้ทั้งในและนอกสถานที่ของห้องทดลองและความสามารถในการเปลี่ยนจอ LCD และกล้องของเครื่องได้ หลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบเครื่องเป็นหลักการของ Photoelasticity หลักการนี้เป็นหลักการที่ช่วยในการตรวจสอบหาความเค้นตกค้างในพลาสติกใสโดยจะเห็นเป็นริ้วสีซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วในการหาความเค้นตกค้างพร้อมทั้งยังเป็นหลักการที่สามารถหาอุปกรณ์ได้ง่ายจากชีวิตประจำวัน นั่นคือ จอ LCD และ กล้อง DSLR เลนส์โพลาไรซ์ ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเครื่องตรวจสอบความเค้นโดยยึดตามหลักการของ Photoelasticity

3.1.2 สร้างเครื่องทดสอบความเค้น

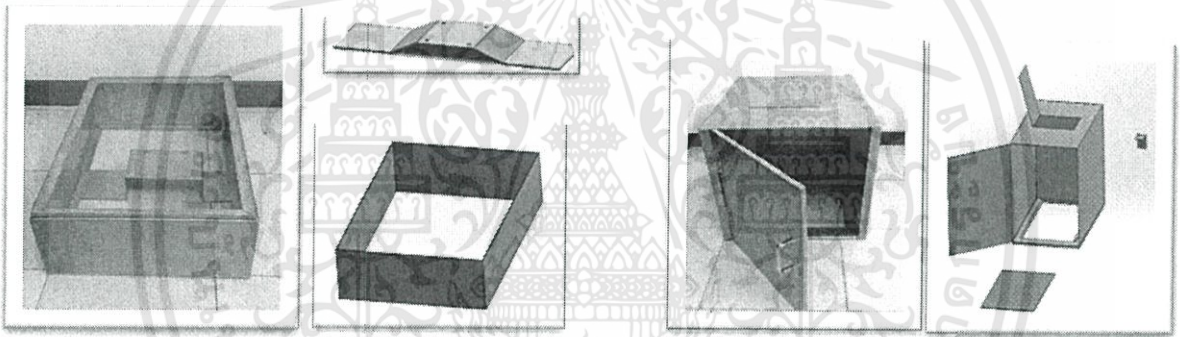
วัสดุที่ใช้

1. สแตนเลส (stainless) หนา 1.5 มิลลิเมตร
2. กระจกขนาด 315 x 490 x 4 มิลลิเมตร
3. จอ LCD ขนาด 19" – 21"
4. กล้อง DSLR
5. Filter ชนิด Polarize
6. บานพับสำหรับเชื่อมต่อประตูทางเข้าของชิ้นงาน และประตูทางเข้าของส่วนติดตั้งกล้อง
7. พลาสติก PC ใช้สำหรับเป็นวัสดุทดลองในการจำลองเพื่อตรวจสอบการคำนวณความเค้นของโปรแกรมและตรวจสอบภาพที่ถ่ายได้จากเครื่องตรวจสอบความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

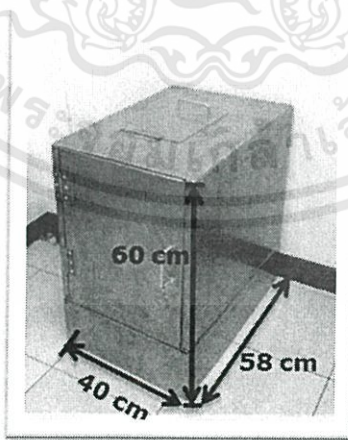
วิธีสร้างเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง

1. ออกแบบเครื่องทดสอบการกระจายความเค้น ที่ใช้ดูการกระจายตัวของความเค้นภายในชิ้นงาน
2. สร้างเครื่องทดสอบความเค้นโดยนำลูมินีเยมมาพับตามแบบที่ได้ออกแบบไว้โดยจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือในส่วนที่1 จะเป็นส่วนของวางจอ LCD ดังรูปที่3.1และส่วนที่ 2จะเป็นส่วนของวางชิ้นงานและติดตั้งกล้อง DSLRดังรูปที่ 3.2
3. นำเหล็กมาเชื่อมกับในส่วนของสองเพื่อทำเป็นช่องของกระจกให้สามารถใส่กระจกได้โดยขนาดความหนาของช่องจะเท่ากับ 0.3 เซนติเมตร
4. เจาะช่องตามแบบที่ออกแบบไว้และใส่บานพับเพื่อทำประตูในที่นี่จะมีสองส่วนที่ต้องใส่บานพับคือ1. ในส่วนของด้านข้างจะทำประตูเพื่อสามารถนำชิ้นงานเข้าไปวางภายในเครื่องได้ และ 2. ส่วนด้านบนของตัวเครื่องโดยจะมีประตูเพื่อให้สามารถนำกล้องไปติดตั้งและสามารถทำการดูภาพจากกล้องได้ก่อนที่จะทำการถ่ายภาพชิ้นงาน
5. นำตัวกล้องLCD ที่ได้ทำไว้แล้วมาเชื่อมกับส่วนที่1 เพื่อให้สามารถถือจอได้
6. ได้เครื่องตรวจสอบความเค้นประกอบส่วนแทนวางจอ LCD และแทนวางชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 ส่วนแทนวางชิ้นงานและติดตั้งกล้อง

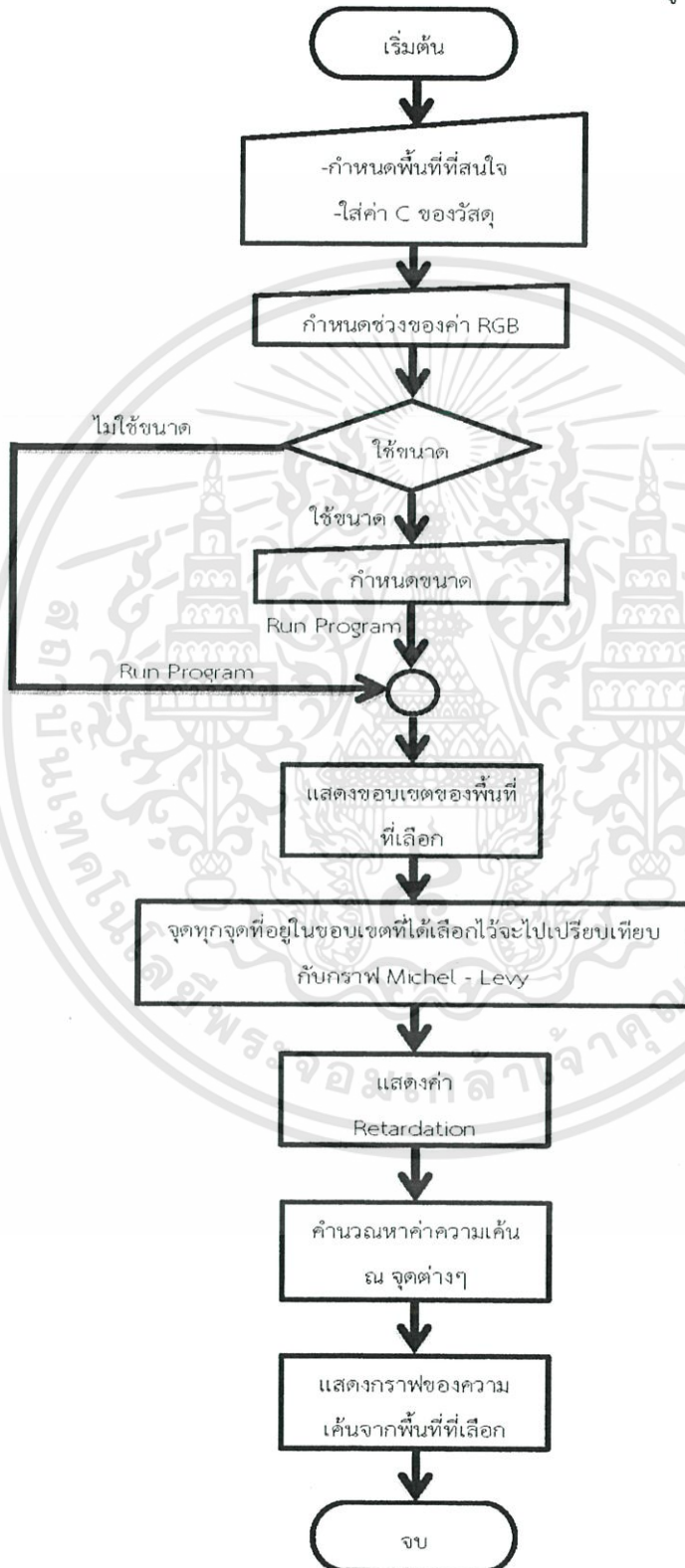
รูปที่ 3.2 ส่วนแทนวางจอ LCD



รูปที่3.3 เครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง

3.2 ศึกษาและเขียนโปรแกรม Matlab

ศึกษาโปรแกรม Matlab เบื้องต้นและได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการเขียนโปรแกรมเพื่อเอามาช่วยในการวิเคราะห์สีจากภาพที่ถ่ายจากชิ้นงานในเครื่องตรวจสอบความเค้นในส่วนของโปรแกรมได้มีการออกแบบโปรแกรมเพื่อช่วยในการวิเคราะห์และการคำนวณความเค้น หลักการทำงานของโปรแกรมเป็นดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Flowchart การทำงานของโปรแกรมการวิเคราะห์ความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การตรวจสอบเครื่องตรวจสอบความเค้น,โปรแกรมและการคำนวณ

ในส่วนนี้จะเป็นการตรวจสอบการถ่ายภาพจากเครื่องโดยภาพที่ได้จากเครื่องให้ความชัดเจนเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์โปรแกรมหรือไม่และตรวจสอบการวิเคราะห์ของโปรแกรมว่าโปรแกรมได้มีการวิเคราะห์สีจากภาพถ่ายของเครื่องถูกต้องหรือไม่ และส่วนสุดท้ายคือการตรวจสอบค่าความเค้นที่ได้

3.3.1 การตรวจสอบการถ่ายภาพจากเครื่องโดยจะมีการตรวจสอบดังนี้

- 1.ตรวจสอบการติดตั้งของจอ LCD ว่าสามารถติดตั้งจอโดยที่จออยู่ในตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ และทำการตรวจสอบในส่วนของกล้องเช่นเดียวกับจอ LCD พร้อมทั้งทำการทดสอบการถ่ายภาพและดูภาพที่ถ่ายได้ว่ามี ความชัดเจนของริ้วสีหรือไม่
- 2.ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม มีการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมโดยจะสั่ง Run โปรแกรม แล้วนำภาพที่ถ่ายได้มาเข้าโปรแกรมและดูการประมวลผลของโปรแกรมว่าเลือกสีและวิเคราะห์สีได้ถูกต้องหรือไม่
- 3.ตรวจสอบค่าความเค้นที่ได้ การตรวจสอบความถูกต้องของความเค้นนี้เราจะมีตรวจสอบโดยคิดจากสามลักษณะคือ
 - คำนวณค่าความเค้นจากโปรแกรม Matlab ซึ่งการคำนวณที่ได้นี้เกิดจากการเขียนโปรแกรมให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์สีภาพและคำนวณค่าความเค้นออกมาได้ โดยค่าของความเค้นที่ได้จะถูกคำนวณจากค่าความหน่วงของแต่ละสีซึ่งมีสมการการคำนวณหาค่าความเค้นดังนี้

$$R = C t \sigma \quad (3.1)$$

- σ คือ ค่าความเค้น
 R คือ ค่าการหน่วงหรือค่าความยาวคลื่นที่ถูกจำกัด (Retardation)
 C คือ ค่า stress optic coefficient (มีค่าเท่ากับ 2.54)
 t คือ ค่าความหนาของชิ้นงาน

ขั้นตอนในการคำนวณด้วย Matlab มีดังนี้

- 1.นำชิ้นงาน(พลาสติกใส PC ที่มีความเค้นตกค้างที่ต่ำมาก) มาวางในลักษณะเดียวกับคานโดยจะมีปากกาจับยึดแผ่นพลาสติกทั้งสองด้าน
- 2.เมื่อจับยึดพลาสติกเรียบร้อยแล้ว นำลูกตุ้มที่น้ำหนัก 1 kg, 2 kg, 3 kg และ 4 kg มาถ่วงบนชิ้นงาน โดยวางลูกตุ้มให้อยู่ในแนวกึ่งกลางของชิ้นงาน
- 3.นำกล้องเลนส์โฟลาริสมาถ่ายภาพชิ้นงาน จะเห็นชิ้นงานเป็นริ้วสี
- 4.นำภาพริ้วสีที่ถ่ายได้จากชิ้นงานมาเข้าโปรแกรม และทำการ Run โปรแกรม จะได้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานออกมาเป็นกราฟ
 - คำนวณความเค้นโดยใช้โปรแกรม Solidwork ในการช่วยจำลองซึ่งขั้นตอนการทำมีดังนี้
 - 1.วาดรูปคานโดยวาดตัวยึดจับแน่นทั้งสองฝั่งและเลือกใช้วัสดุ PS ลงในโปรแกรม Solidwork
 - 2.ทำการ Simulation ในโปรแกรม Solid work โดยให้แรงกับคานที่จุดกึ่งกลางของคานดังนี้ 1 kg, 2 kg, 3 kg และ 4 kg
 - 3.เมื่อ Simulation ในโปรแกรม Solidwork แล้ว โปรแกรมจะแสดงภาพที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงขนาดต่างๆมากระทำบนคาน และจะแสดงค่าความเค้นในแต่ละระยะของคานออกมา

- คำนวณความเค้นโดยการคำนวณจากทฤษฎีของคาน
- 1.ศึกษาการคำนวณของคานยึดติดแน่นทั้งสองฝั่ง
 - 2.คำนวณเพื่อหาความเค้นที่เกิดบนคานเมื่อใส่แรงไป ณ จุดกึ่งกลางของคานสมการการคำนวณที่ใช้คือ

$$M = \frac{P(a)(b)^2}{L^2} \quad (3.2)$$

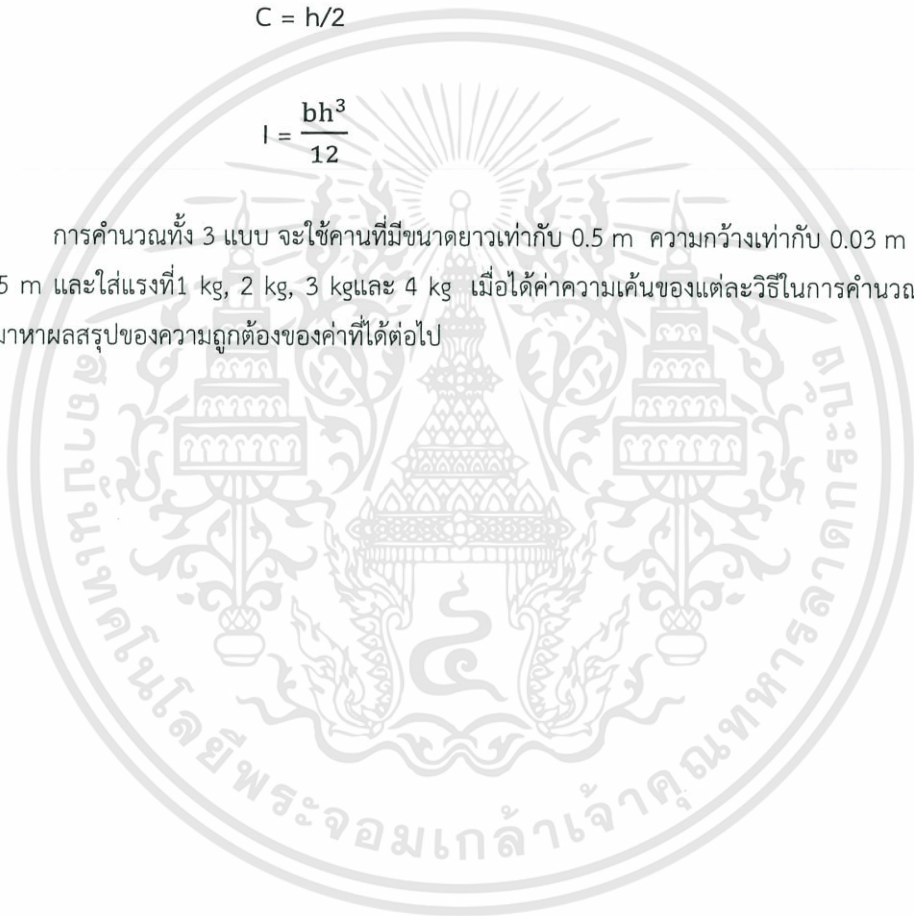
สมการที่ 3.2 เป็นสมการหาโมเมนต์ของคานแบบยึดติดทั้งสองฝั่ง เมื่อได้ค่าโมเมนต์ของคานแล้ว นำค่าที่ได้ไปหาสมการของความเค้นจากสมการที่ 3.3

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (3.3)$$

$$C = h/2 \quad (3.4)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.5)$$

การคำนวณทั้ง 3 แบบ จะใช้คานที่มีขนาดยาวเท่ากับ 0.5 m ความกว้างเท่ากับ 0.03 m ความหนาเท่ากับ 0.0015 m และใส่แรงที่ 1 kg, 2 kg, 3 kg และ 4 kg เมื่อได้ค่าความเค้นของแต่ละวิธีในการคำนวณแล้วนำค่าความเค้นที่ได้มาหาผลสรุปของความถูกต้องของค่าที่ได้ต่อไป



บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในการศึกษาความเค้นตกค้างในชิ้นงานฉีดพลาสติกในส่วนของตัวเครื่องทดสอบความเค้นตกค้างและส่วนการทดลองมีการออกแบบการทดลองโดยนำชิ้นงานพลาสติกที่ไม่มีความเค้นตกค้างอยู่หรือมีความเค้นตกค้างน้อยมากจนให้ถือว่าไม่มี ที่มีขนาด กว้าง3cm. xยาว50cm. xหนา0.15cm. โดยนำแรงมาใส่ขนาดต่างๆตรงตำแหน่งกลางชิ้นงาน เพื่อให้เกิดความเค้นในแต่ละค่า ดังการทดลอง3.3

4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบเครื่องทดสอบความเค้นตกค้าง

4.1.1 ส่วนบนของเครื่อง

1. จากการออกแบบเครื่องให้ส่วนบนของเครื่องเป็นแบบทึบแสง เครื่องสามารถป้องกันแสงจากภายนอกที่ไม่ได้ผ่านการโพลาไรส์ ซึ่งแสงที่ไม่ได้โพลาไรส์อาจส่งผลให้ได้ภาพถ่ายที่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี
2. การออกแบบตัวยึดจับกล่อง เพื่อให้ในการถอดใส่เปลี่ยนตัวกล้องมีการทำงานที่ง่ายขึ้น

4.1.2 ส่วนล่างของเครื่อง

ส่วนล่างของเครื่องออกแบบมาเพื่อใส่หน้าจอ LCD ซึ่งหน้าจอ LCDนั้นสามารถทำให้แสงที่ส่องผ่านชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ ทำให้ภาพที่ถ่ายได้นั้นมีความคมชัดและได้รูสีที่เสมือนจริงมากยิ่งขึ้น และมีการออกแบบตัวยึดจับหน้าจอ LCD ให้มีการถอดใส่ได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน

4.2 ผลการทดลองที่ได้การคำนวณด้วยโปรแกรม

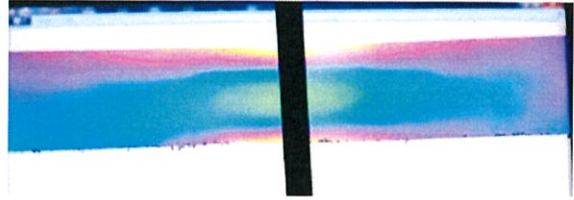
4.2.1 รูปรูสีของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

นำชิ้นงานที่ได้เตรียมไว้มาใส่แรงในตำแหน่งตรงกลางชิ้นงานที่นำมาทดลองโดยใส่แรงขนาด9.81 ,19.62 , 29.43 , 39.24 นิวตัน ดังรูปที่ 4.1(ก.), 4.1(ข.), 4.1(ค.), 4.1(ง.)ตามลำดับแต่ละค่าจะทำให้เกิดความเค้นใดๆและรูสีจากความเค้นนั้นๆ

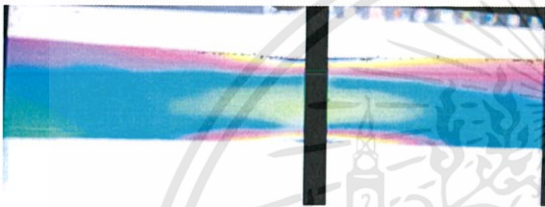
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



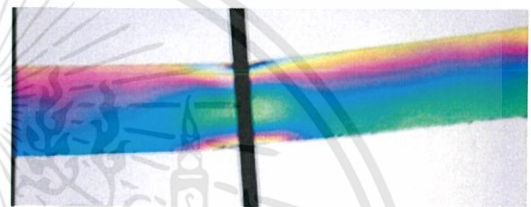
รูปที่ 4.1(ก.) รีวของชิ้นงานที่เกิดจากการ ใส่แรงลงไป 9.81 นิวตัน



รูปที่ 4.1(ข.) รีวของชิ้นงานที่เกิดจากการ ใส่แรงลงไป 19.62 นิวตัน



รูปที่ 4.1(ค.) รีวของชิ้นงานที่เกิดจากการ ใส่แรงลงไป 29.43 นิวตัน



รูปที่ 4.1(ง.) รีวของชิ้นงานที่เกิดจากการ ใส่แรงลงไป 39.24 นิวตัน

จากภาพที่ 4.1(ก.) , 4.1(ข.) , 4.1(ค.) , 4.1(ง.) เมื่อใส่แรงลงไป 9.81 , 19.62 , 29.43 , 39.24 นิวตัน ตามลำดับ รีวสีความเค้นที่เกิดขึ้นพบว่าปรากฏแถบสีเขียว ฟ้าม่วง และเหลือง ซึ่งจาก รูปที่ 2.6 จะแสดงให้เห็นว่าแถบของสีเขียวจะเป็นสีที่เกิดความเค้นมากกว่าสีอื่นๆที่เกิดขึ้น เมื่อใส่แรงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แถบของสีเขียวกว้างและชัดเจนและเริ่มมีแถบสีเหลืองที่มีค่าความเค้นมากในลำดับถัดจากแถบสีเขียวปรากฏเพิ่มขึ้นด้วย(ซึ่งค่าความเค้นของสีต่างๆได้จากการคำนวณของโปรแกรม)

4.2.2 โปรแกรมคำนวณความเค้น

เมื่อนำรูปที่ได้ถ่ายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 มาเข้าโปรแกรมเพื่อหาค่าความเค้น ดังรูปที่ 4.2(ก.), 4.2(ค.), 4.2(จ.), 4.2(ข.) ซึ่งผลที่ได้จากการนำรูปมาตรวจสอบความเค้นสามารถสรุปออกมาเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.2(ข.), 4.2(ง.), 4.2(ฉ.), 4.2(ฉ.) ตามลำดับ

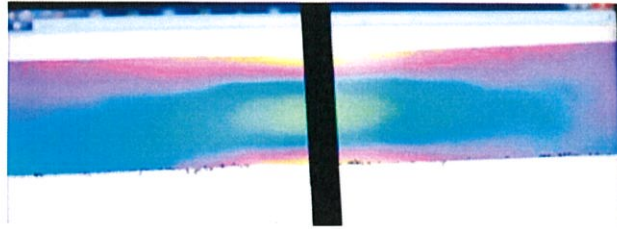


รูปที่ 4.2(ก.) รูปรีวิวของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 9.81 นิวตัน ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น

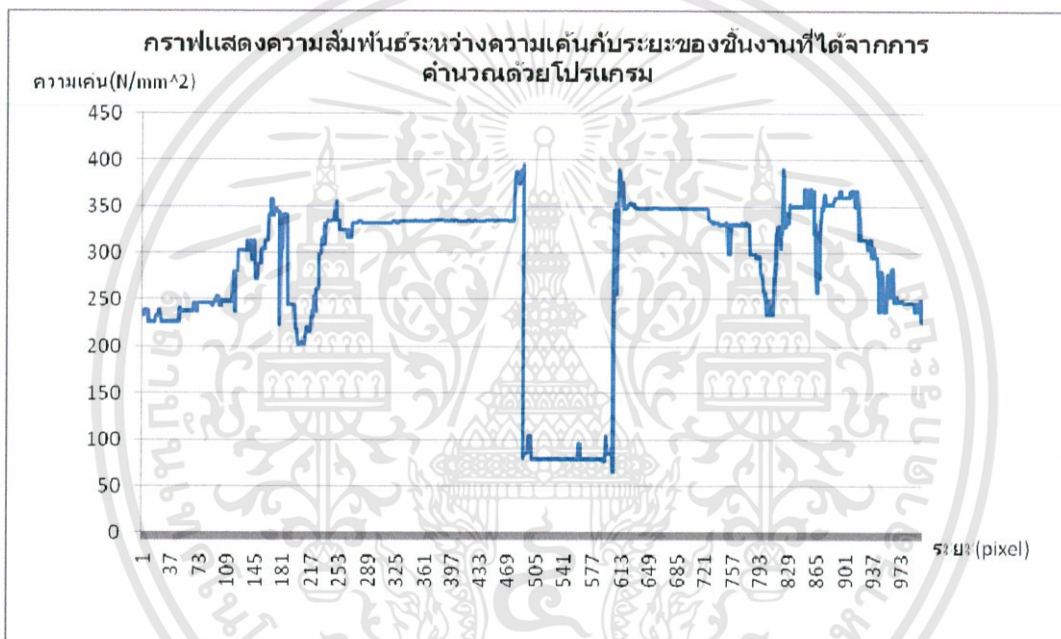


รูปที่ 4.2(ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 9.81 นิวตัน

จากรูปที่ 4.2(ก.) จะเห็นว่ารีวิวสีเขียวเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ และจากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ารีวิวสีเขียวมีค่า R มากกว่าสีอื่นๆ ทำให้ความเค้นมีค่ามากกว่าสีอื่นๆ ในรูป ซึ่งเมื่อนำรูปเข้าโปรแกรมโปรแกรมจะคำนวณความเค้นบริเวณนั้นได้เป็นค่าเฉลี่ยออกมา มีค่าเท่ากับ 350 N/mm^2 ซึ่งมีค่าความเค้นมากกว่าสีอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2(ข.)

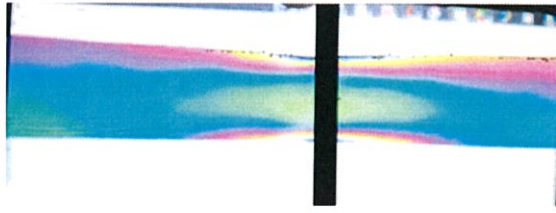


รูปที่ 4.2(ค.) รูปรีวของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 19.62 นิวตัน ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น

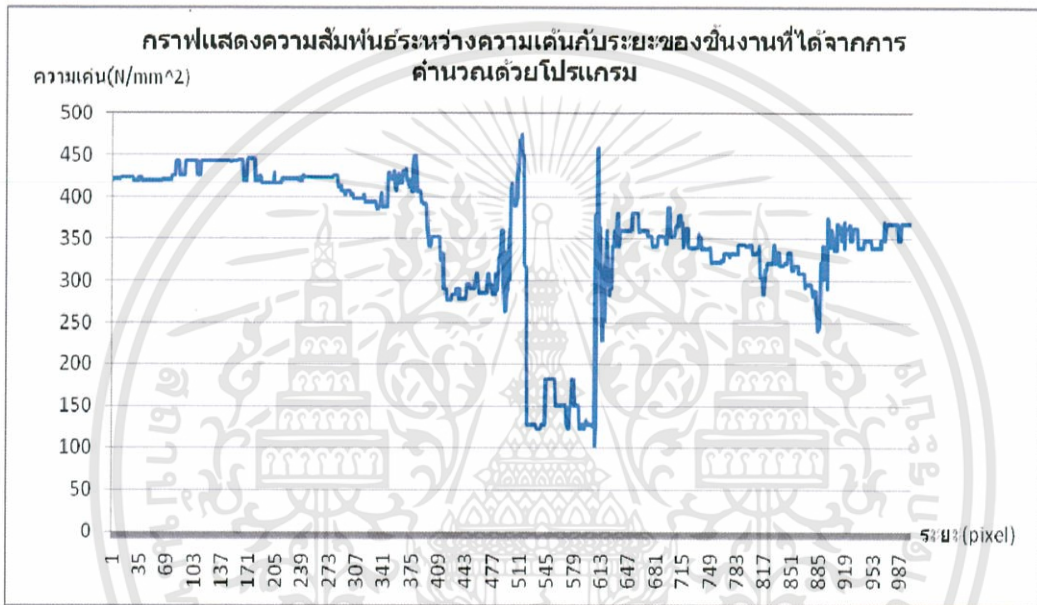


รูปที่ 4.2(ง.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 19.62 นิวตัน

จากรูปที่ 4.2(ค.) จะเห็นว่ารีวสีเขียวเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ และจากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ารีวสีเขียวมีค่า R มากกว่าสีอื่นๆ ทำให้ความเค้นมีค่ามากกว่าสีอื่นๆ ในรูป ซึ่งเมื่อนำรูปเข้าโปรแกรม โปรแกรมจะคำนวณความเค้นบริเวณนั้นได้เป็นค่าเฉลี่ยออกมา มีค่าเท่ากับ 390 N/mm² ซึ่งมีค่าความเค้นมากกว่าสีอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2(ง.)

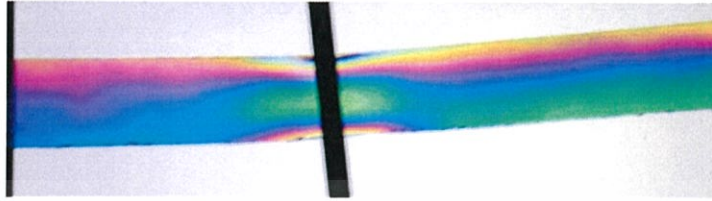


รูปที่ 4.2(จ.) รูปรีวของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 29.43 นิวตัน ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น

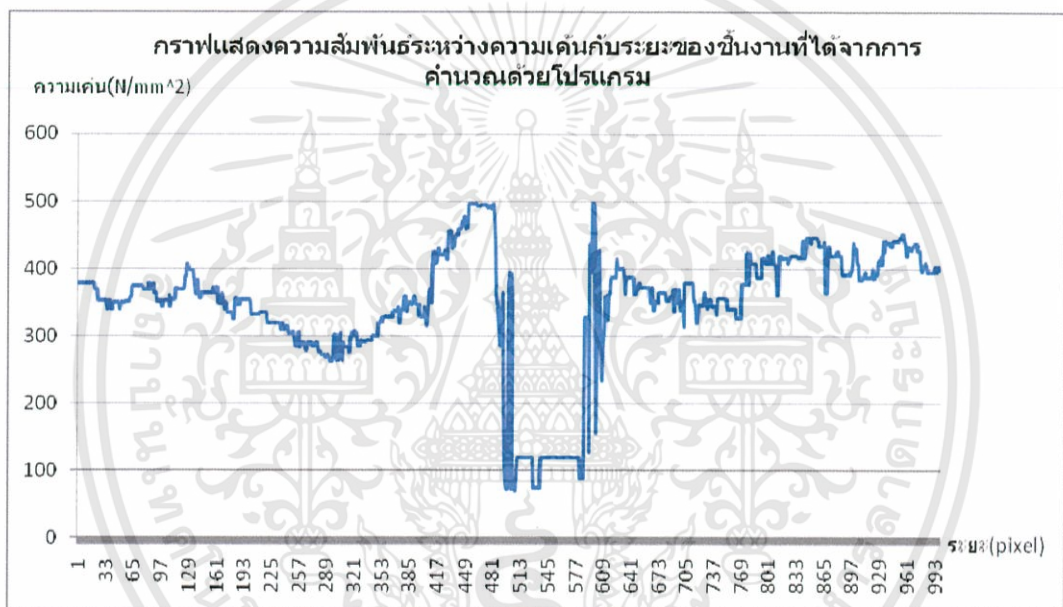


รูปที่ 4.2(ฉ.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 29.43 นิวตัน

จากรูปที่ 4.2(จ.) จะเห็นว่ารีวสีเขียวเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ และจากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ารีวสีเขียวมีค่า R มากกว่าสีอื่นๆ ทำให้ความเค้นมีค่ามากกว่าสีอื่นๆ ในรูป ซึ่งเมื่อนำรูปเข้าโปรแกรม โปรแกรมจะคำนวณความเค้นบริเวณนั้นได้เป็นค่าเฉลี่ยออกมา มีค่าเท่ากับ 470 N/mm^2 ซึ่งมีค่าความเค้นมากกว่าสีอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2(ฉ.)



รูปที่ 4.2(ข.) รูปรีวของชิ้นงานที่เกิดจากการใส่แรงลงไป 39.24 นิวตัน ที่เข้าโปรแกรมตรวจสอบความเค้น



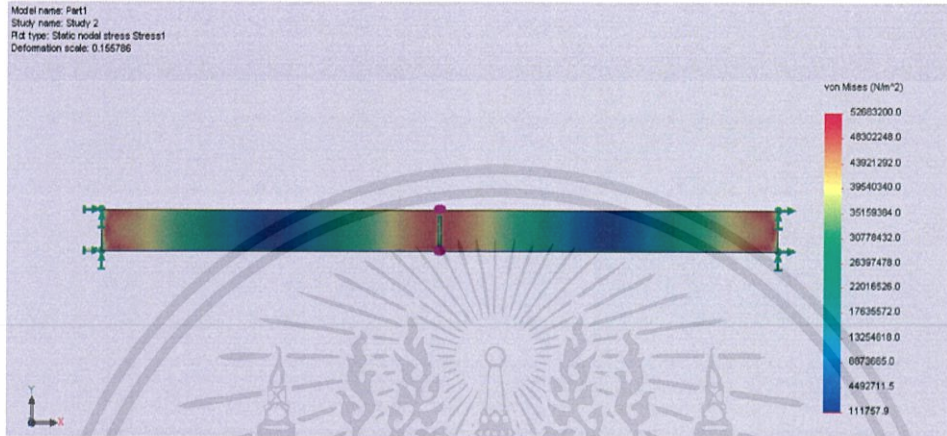
รูปที่ 4.2(ฉ.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมโดยใส่แรงขนาด 39.24 นิวตัน

จากรูปที่ 4.2(ข.) จะเห็นว่ารีวสีเขียวเกิดขึ้นเป็นบริเวณเล็กๆ และจากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่ารีวสีเขียวมีค่า R มากกว่าสีอื่นๆ ทำให้ความเค้นมีค่ามากกว่าสีอื่นๆ ในรูป ซึ่งเมื่อนำรูปเข้าโปรแกรม โปรแกรมจะคำนวณความเค้นบริเวณนั้นได้เป็นค่าเฉลี่ยออกมา มีค่าเท่ากับ 500 N/mm^2 ซึ่งมีค่าความเค้นมากกว่าสีอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 4.2(ฉ.)

จากผลสรุปที่ได้จากโปรแกรมดังรูป 4.2(ข.), 4.2(ง.), 4.2(ฉ.), 4.2(ฉ.) จะเห็นว่า มีค่าความเค้นมากที่สุด 350 , 390 , 470 , 500 N/mm^2 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นนั้นแปรผันตามขนาดแรงที่ใส่ให้ชิ้นงานเพิ่มขึ้นเช่นกัน

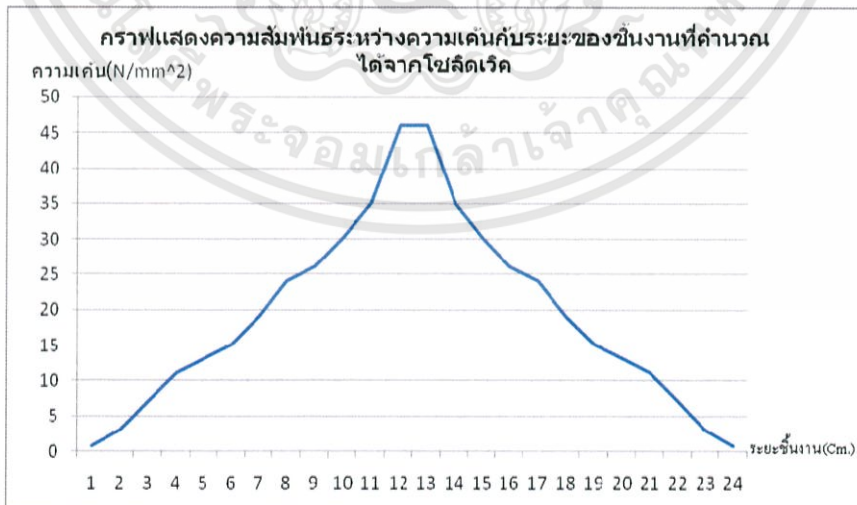
4.3 โปรแกรมโซลิตเว็คคำนวณความเค้น

เมื่อทำการ simulation ใส่แรงในแต่ละค่าที่ตำแหน่งตรงกลางของชิ้นงานที่ได้สร้างจำลองขึ้น ทำให้เกิดความเค้นในชิ้นงานและโปรแกรมจะแสดงความเค้นในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3

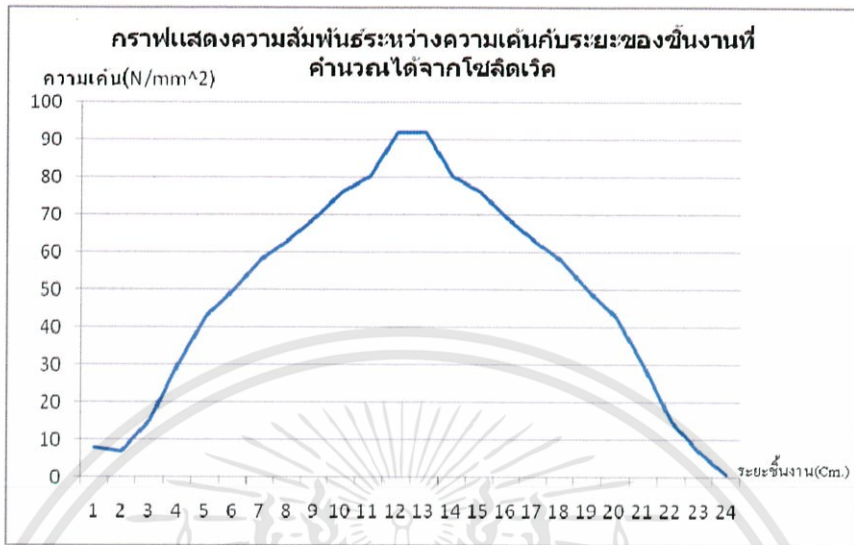


รูปที่ 4.3 โปรแกรมโซลิตเว็คแสดงแนวโน้มของรีวิสิเมื่อใส่แรงใดๆ

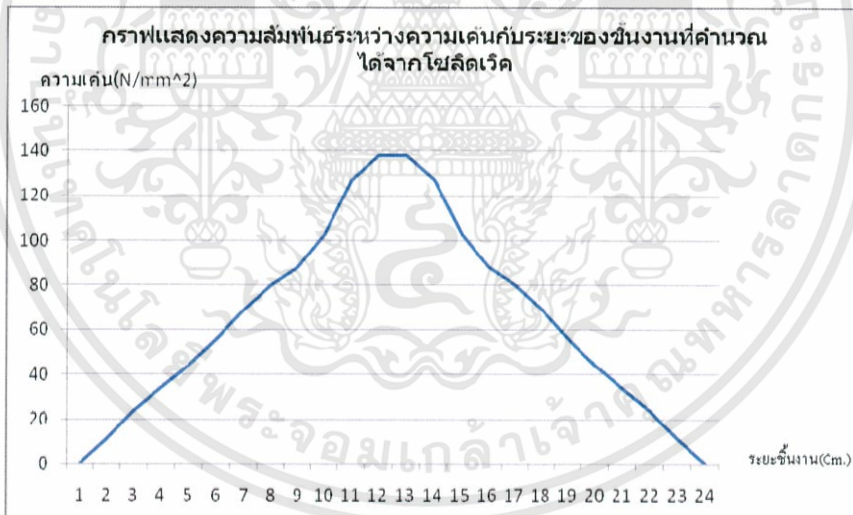
จากรูปที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานมีความเค้นสูงสุดที่ตำแหน่งกลางชิ้นงานที่ได้ใส่แรงลงไป และในตำแหน่งบริเวณซ้ายขวาที่ห่างออกไป ค่าความเค้นจะมีค่าลดลงไปเรื่อยๆ โดยดูได้จากรีวิสิแดงไล่ไปถึงรีวิสีน้ำเงิน จะมีค่าความเค้นจากค่ามากไล่ไปค่าน้อยตามลำดับ โดยสามารถเทียบได้จากแท่งรีวิสิแสดงค่าความเค้นด้านขวามือของภาพ และเนื่องจากที่ปลายของชิ้นงานมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีคานยึดด้านปลายทั้งสองข้างและเมื่อนำช่วงที่มีรีวิสิแดงไปรีวิสีน้ำเงินมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.4(ก.), 4.4(ข.), 4.4(ค.), 4.4(ง.) โดยใส่แรงขนาด 9.81 , 19.62 , 29.43 , 39.24นิวตัน ตามลำดับ



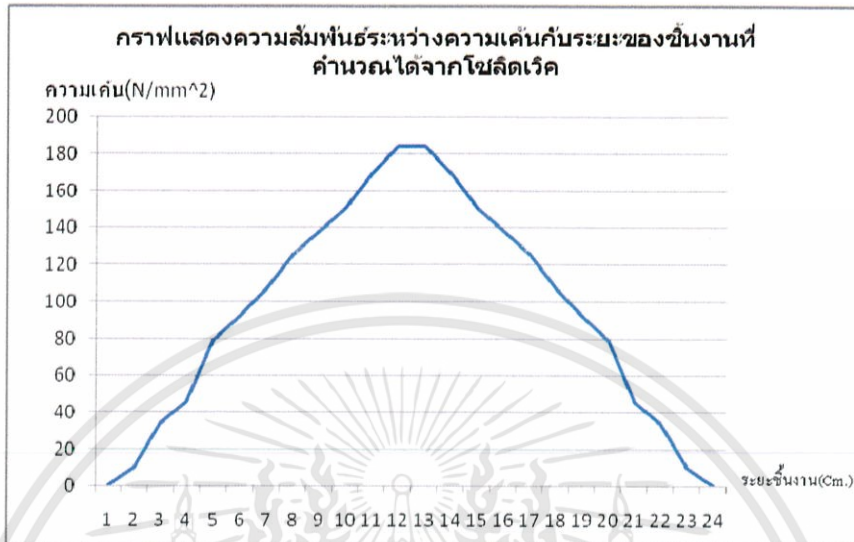
รูปที่ 4.4(ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็คโดยใส่แรงขนาด 9.81 นิวตัน



รูปที่ 4.4(ข.)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็ค โดยใส่แรงขนาด 19.62 นิวตัน



รูปที่ 4.4(ค.)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็คโดยใส่แรงขนาด 29.43 นิวตัน



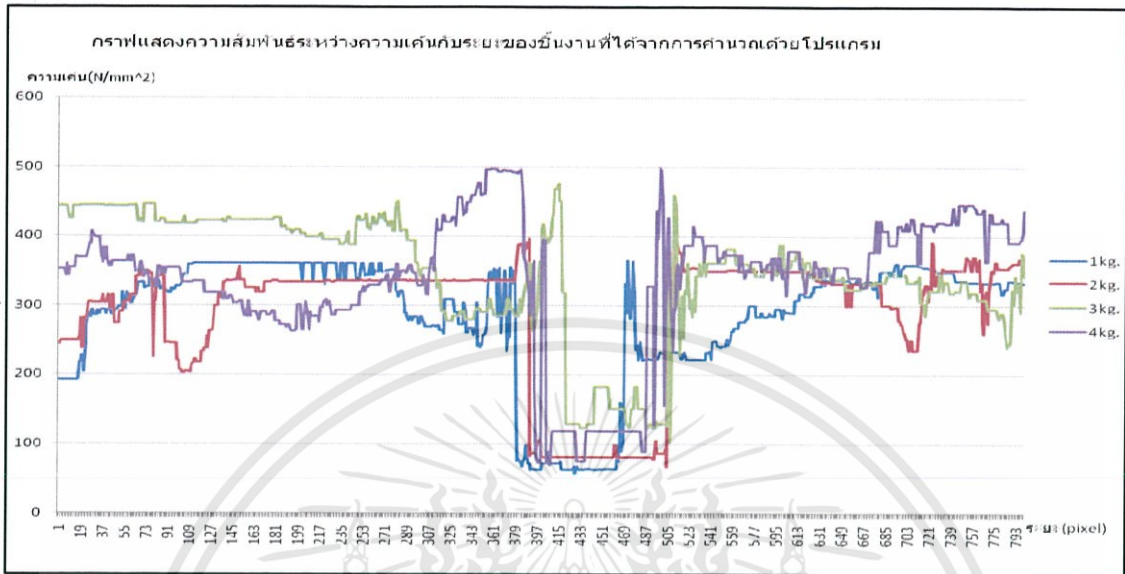
รูปที่ 4.4(ง.)ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็คโดยใส่แรงขนาด 39.24 นิวตัน

สรุปได้ว่า

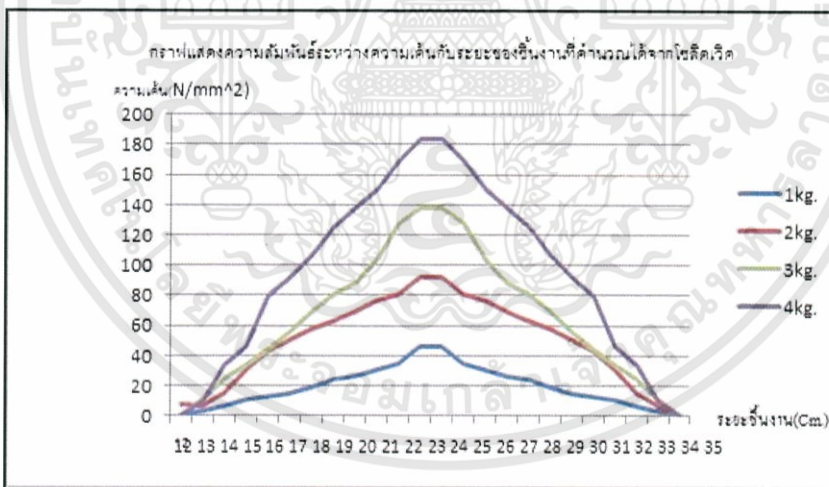
- จากรูป 4.4(ก.) ใส่แรง 9.81 นิวตัน จะเกิดความเค้นสูงสุด 47 N/mm²
- จากรูป 4.4(ข.) ใส่แรง 19.62 นิวตัน จะเกิดความเค้นสูงสุด 91 N/mm²
- จากรูป 4.4(ค.) ใส่แรง 29.43 นิวตัน จะเกิดความเค้นสูงสุด 138 N/mm²
- จากรูป 4.4(ง.) ใส่แรง 39.24 นิวตัน จะเกิดความเค้นสูงสุด 182 N/mm²

4.4 เปรียบเทียบระหว่างการคำนวณด้วยโปรแกรมกับโซลิตเว็ค

เมื่อนำกราฟที่ได้จากการใส่แรงแต่ละค่ามาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรมรูปที่ 4.5(ก.) และได้จากการคำนวณด้วยโซลิตเว็ครูปที่ 4.5(ข.) พบว่า จากภาพที่ 4.5(ก.) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟสีม่วง สีเขียว สีแดง สีน้ำเงิน มีความเค้นสูงสุดที่ 500 , 470 , 390 , 350 N/mm² ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับรูปที่ 4.5(ข.) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็คเส้นกราฟสีม่วง สีเขียว สีแดง สีน้ำเงิน มีความเค้นสูงสุดที่ 500 , 470 , 390 , 350 N/mm² ตามลำดับ



รูปที่ 4.5(ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม



รูปที่ 4.5(ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะที่ได้จากการคำนวณโซลิตเว็ค

4.5 เปรียบเทียบการคำนวณความเค้นจากหลักการของคานกับโปรแกรม Solidwork

จากการคำนวณได้สมการ 2 สมการ ในแต่ละน้ำหนักที่ทำการทดลอง ดังนี้

- สมการคำนวณหาความเค้นที่มีน้ำหนัก 1 kg มาถ่วงกับชิ้นงาน

$$0 \leq x < 0.25 \quad \sigma = \frac{(4.9050x - 0.6131)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 436000000x - 54497777.78 \quad \text{N/m}^2$$

$$0.25 \leq x < 0.50 \quad \sigma = \frac{(1.8394 - 4.9050x)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 163502222.2 - 436000000x \quad \text{N/m}^2$$

- สมการคำนวณหาความเค้นที่มีน้ำหนัก 2 kg มาถ่วงกับชิ้นงาน

$$0 \leq x < 0.25 \quad \sigma = \frac{(9.81X - 1.2262)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 872000000x - 108995555.6 \quad \text{N/m}^2$$

$$0.25 \leq x < 0.50 \quad \sigma = \frac{(3.6788 - 9.81X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 327004444.4 - 872000000x \quad \text{N/m}^2$$

- สมการคำนวณหาความเค้นที่มีน้ำหนัก 3 kg มาถ่วงกับชิ้นงาน

$$0 \leq x < 0.25 \quad \sigma = \frac{(14.7150X - 1.8393)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 1308000000x - 163493333.3 \quad \text{N/m}^2$$

$$0.25 \leq x < 0.50 \quad \sigma = \frac{(5.5182 - 14.7150X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 490506666.7 - 1308000000x \quad \text{N/m}^2$$

- สมการคำนวณหาความเค้นที่มีน้ำหนัก 4 kg มาถ่วงกับชิ้นงาน

$$0 \leq x < 0.25 \quad \sigma = \frac{(19.62X - 2.4525)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 1744000000x - 218000000 \quad \text{N/m}^2$$

$$0.25 \leq x < 0.50 \quad \sigma = \frac{(7.3575 - 19.62X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 654000000 - 1744000000x \quad \text{N/m}^2$$

จากสมการเมื่อนำค่า x ที่ระยะต่างๆไปแทนในสมการจะได้ค่าความเค้นที่ระยะต่างๆเท่ากับ Solidwork ซึ่งการคำนวณสมการความเค้นที่ได้ออกมาเป็นการใช้หลักการเดียวกับการคำนวณคาน สามารถสรุปการคำนวณความเค้นจากสมการได้ว่ามีความสอดคล้องกับการ Simulation ของ Solidwork คือให้ผลไปในทางทิศเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมจึงให้ข้อสรุปเดียวกันกับ Solidwork คือค่าความเค้นจะสูงสุดเมื่อคิดจากระยะกึ่งกลางของชิ้นงานและค่อยๆลดลงเป็นในลักษณะกราฟพระฆังคว่ำ



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการดำเนินโครงการ การสร้างเครื่องทดสอบความเค้นตกค้าง สามารถสรุปได้ดังนี้

1.การพัฒนาเครื่องทดสอบความเค้นโดยออกแบบให้ทึบแสงช่วยให้เห็นริ้วสับนชิ้นงานที่ชัดเจนมากขึ้นทำให้ถ่ายภาพออกมาสามารถเห็นริ้วสีได้ชัดเจน

2.โปรแกรมในการช่วยวิเคราะห์สีช่วยเพิ่มความแม่นยำในการเปรียบเทียบริ้วสีระหว่างริ้วสีที่เกิดบนชิ้นงานกับริ้วสีของกราฟ Michel-levy ทำให้ผลของการคำนวณออกมาแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น

3.การทดสอบการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมกับการคำนวณจาก Solidwork ผลของการคำนวณที่ได้มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากสมการที่ใช้ในโปรแกรมจะมีการคิดความเค้นที่ได้เป็นผลต่างของความเค้นในแนวแกนสองแกน ส่วน Solidwork เป็นการคำนวณความเค้นโดยการ Simulation ซึ่งเป็นค่าของความเค้นจริง ทำให้ค่าของความเค้นที่ออกมาไม่เท่ากัน แต่มีแนวโน้มของค่าความเค้นไปในทางทิศทางเดียวกันคือ ความเค้นจะสูงที่สุดบริเวณจุดตรงกลางของชิ้นงาน(ไม่คิดจุดที่คานถ่วงน้ำหนักมาวาง) แล้วความเค้นจะค่อยๆลดลงเป็นในลักษณะกราฟระฆังคว่ำแสดงวิธีการคำนวณความเค้นที่ได้จากโปรแกรม Solidwork ในภาคผนวก ง

5.2 วิจารณ์ผลการทดสอบ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบของเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้างและโปรแกรมที่นำมาช่วยวิเคราะห์ พบปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาและความคลาดเคลื่อนทางการทดสอบ ได้แก่

1. เมื่อออกแบบเครื่องตรวจสอบความเค้นให้สามารถเปลี่ยนจอได้จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความเข้มแสงที่ไม่เท่ากัน เมื่อถ่ายภาพออกมาทำให้เกิดสีที่คลาดเคลื่อนกัน
2. กล้อง DSLR ที่สามารถเปลี่ยนได้นั้น เมื่อนำมาติดตั้งใหม่ทำให้ต้องมีการปรับมุมของเลนส์โฟลาร์ไรซ์ ซึ่งหากปรับไม่ตรงตาม 90 องศา ก็ส่งผลให้ภาพริ้วสีที่ได้คลาดเคลื่อน
3. การทำเครื่องทดสอบความเค้นเป็นแบบทึบแสงช่วยให้ภาพที่ถ่ายริ้วสับนชิ้นงานชัดเจนมากกว่าการทดสอบแบบไม่ทึบแสง
4. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์สีที่เขียนขึ้น ช่วยวิเคราะห์สีได้แม่นยำกว่าใช้สายตาตรวจสอบทำให้ผลที่ได้แม่นยำกว่าใช้สายตาในการเปรียบเทียบสี

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดสอบความเค้นตangk้างควรใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา
2. สร้างวงจรเพื่อใช้ต่อกับจอคอมพิวเตอร์ที่นำมาประกอบทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง
3. โปรแกรมวิเคราะห์สีที่เขียนขึ้นได้ใช้หลักการของค่า RGB ในการวิเคราะห์สี ถ้ามีการปรับปรุงในส่วนโปรแกรมให้เปลี่ยนจากการใช้ หลักการ RGB เป็น หลักการ LAB



เอกสารอ้างอิง

- [1] “พลาสติกในอุตสาหกรรม” [Online]. Available:
http://158.108.46.110/journal_th/download.php?name=M96ZUZ4Mon21403.pdf&file_basename=33-42%20%AA%B9%D4%B5%D2.pdf
- [2] พิเชษฐ์ พินิจ (2552). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟโตอิลาสติกซิตีและโฟโตอิลาสติกซิตีเชิงเลข, วิศวกรรมสาร มข.,36(3), กรกฎาคม - กันยายน 2552, หน้า 195 - 203.)
- [3] www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=15
- [4] A.S. Maxwell and A. Turnbull, Polymer Testing, 22, 259-265, (2003)
- [5] “Michel-Levy Birefringence Chart” [Online]. Available :
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/polarizedlight/michellevy/index.html>
- [6] micro.magnet.fsu.edu/primer/java/polarizedlight/micnellevy/index.html Interactive Michael-Levy Chart JAVA tutorial.
- [7] tonanasia.com/technical_detail.php?id_tech=165
- [8] www.nmt.ac.th/home/chemistry/09.html
- [9] www.elecnet.chandra.ac.th/courses/ELEC2101/chaptor_6/stress.doc
- [10] www.gsithailand.com/showdetail.asp?boardid=83
- [11] pichet-pinit.in.th/photoelasticity/
- [12] www.gsithailand.com/showdetail.asp?boardid=83
- [13] www.klongdigital.com/photoshop/photoshop12
- [14] www.maceducation.com/e-knowledge/2432209100/17.htm
- [15] สุรเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. กลศาสตร์ของแข็ง: ครอบคลุมตามหลักสูตร ปวส. กรุงเทพฯ :ซีเอ็ดยูเคชั่น,2540.



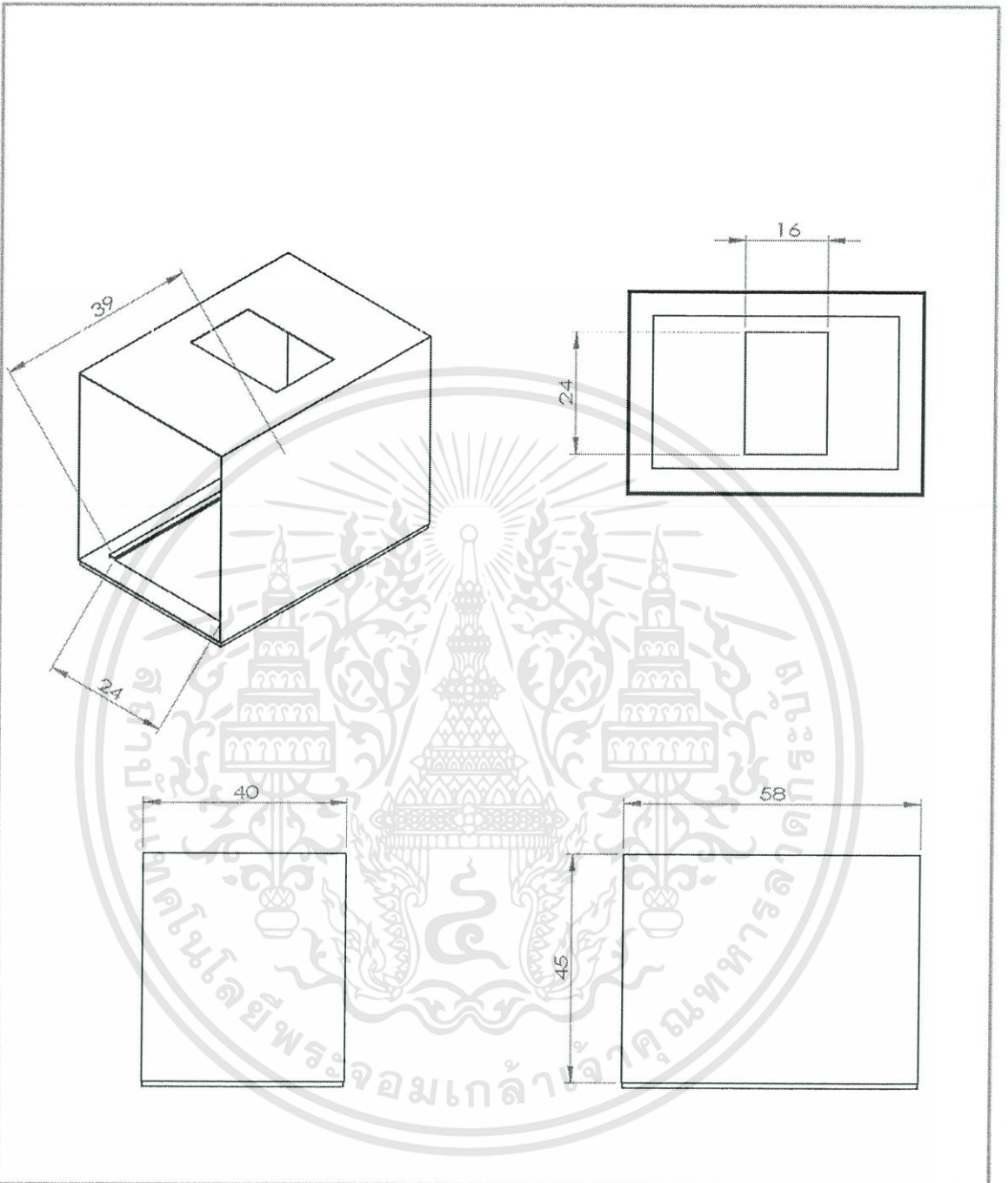
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



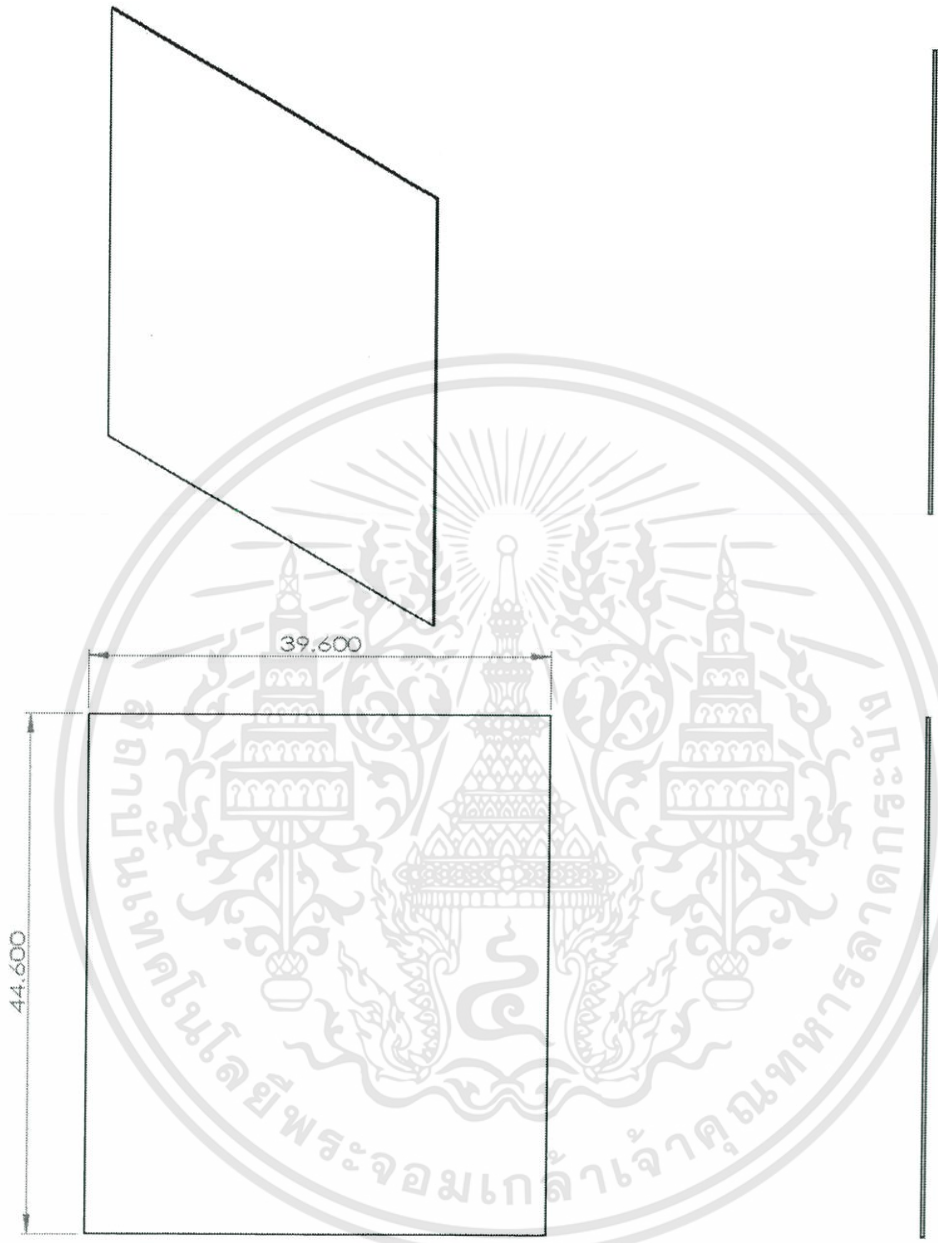
ภาคผนวก ก
แบบเครื่องตรวจสอบความเค้นตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:										
TOLERANCES:										
LINEAR:										
ANGULAR:										
DRAWN			SIGNATURE		DATE		TITLE			
CHK'D										
APP'D										
MFG										
D.A.					MATERIAL:		DWG NO		A4	
							upper box			
					WEIGHT:		SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	

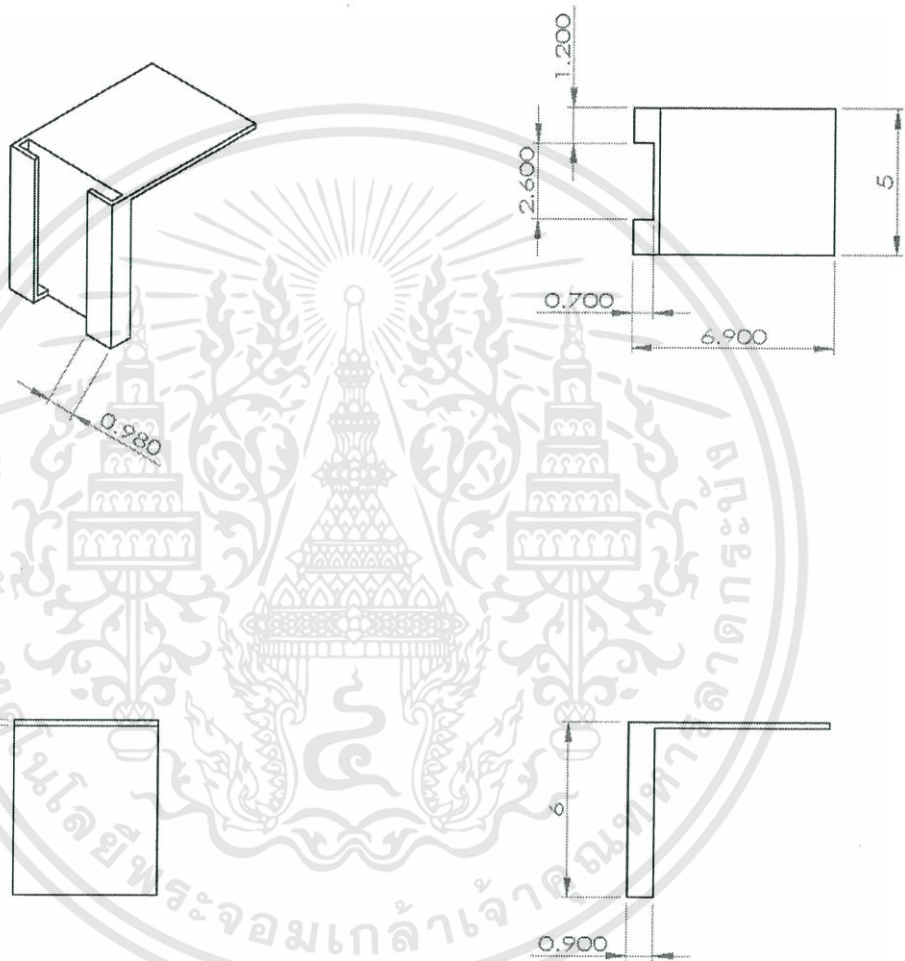
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก2
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES			DO NOT SCALE DRAWING			REVISION		
DRAWN			SIGNATURE			DATE			TITLE:					
CHK'D														
APP'D														
MFC														
O.A.						MATERIAL:			DWG NO.			A4		
						WEIGHT:			SCALE: 1:3			SHEET 1 OF 1		

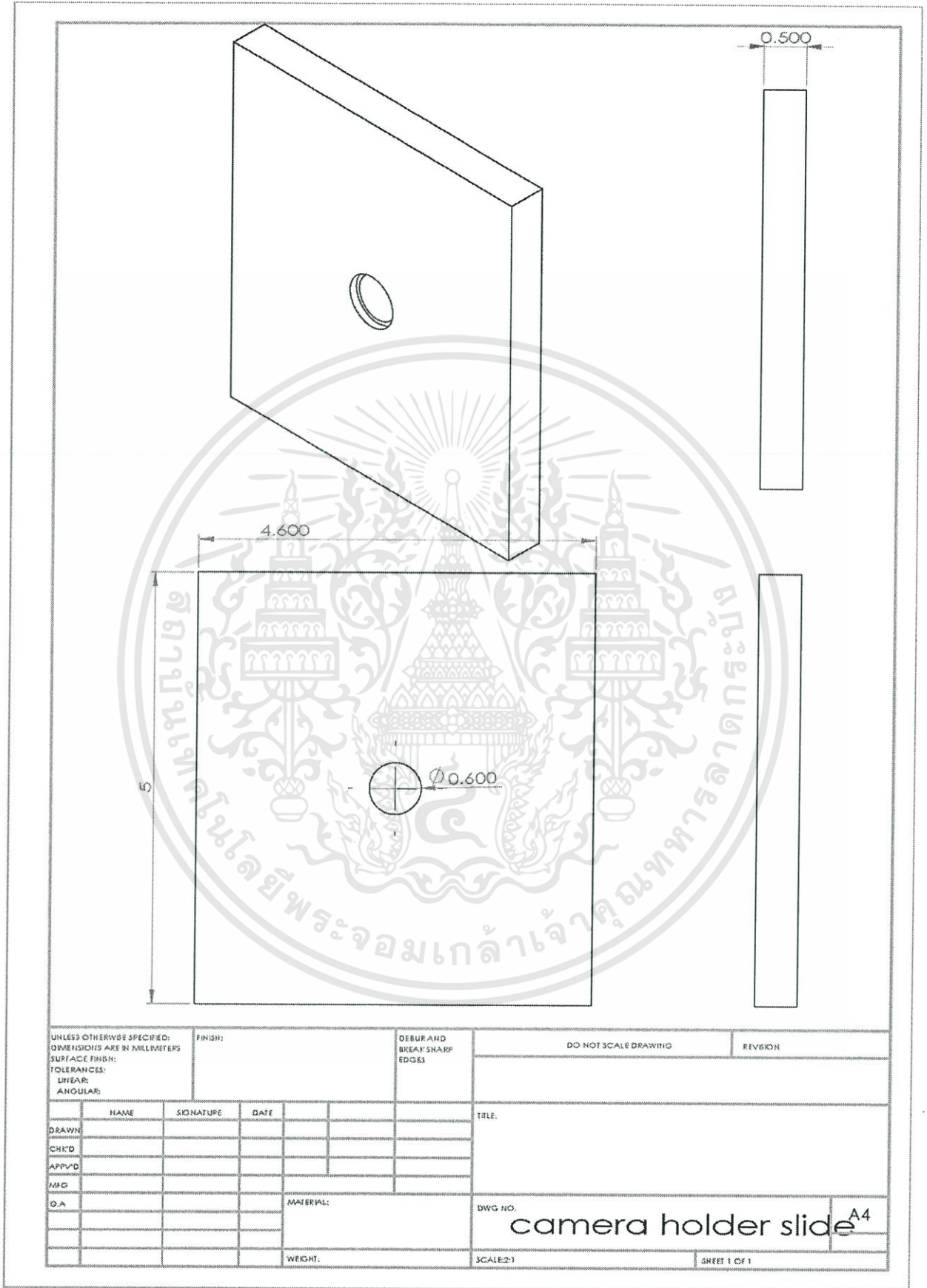
door

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก3
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

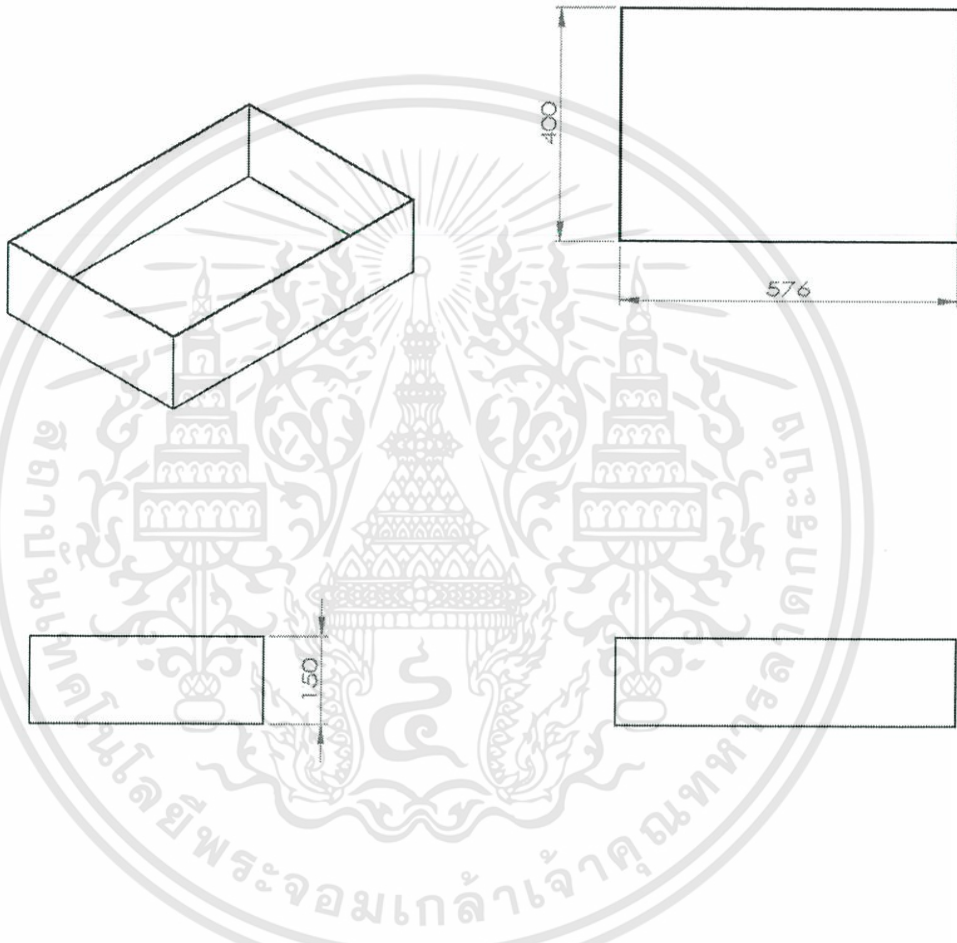


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
										TITLE:	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE			
CHK'D											
APP'VD											
MFG											
O.A.						MATERIAL:		DWG. NO.		A4	
								camera holder			
						WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก4
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

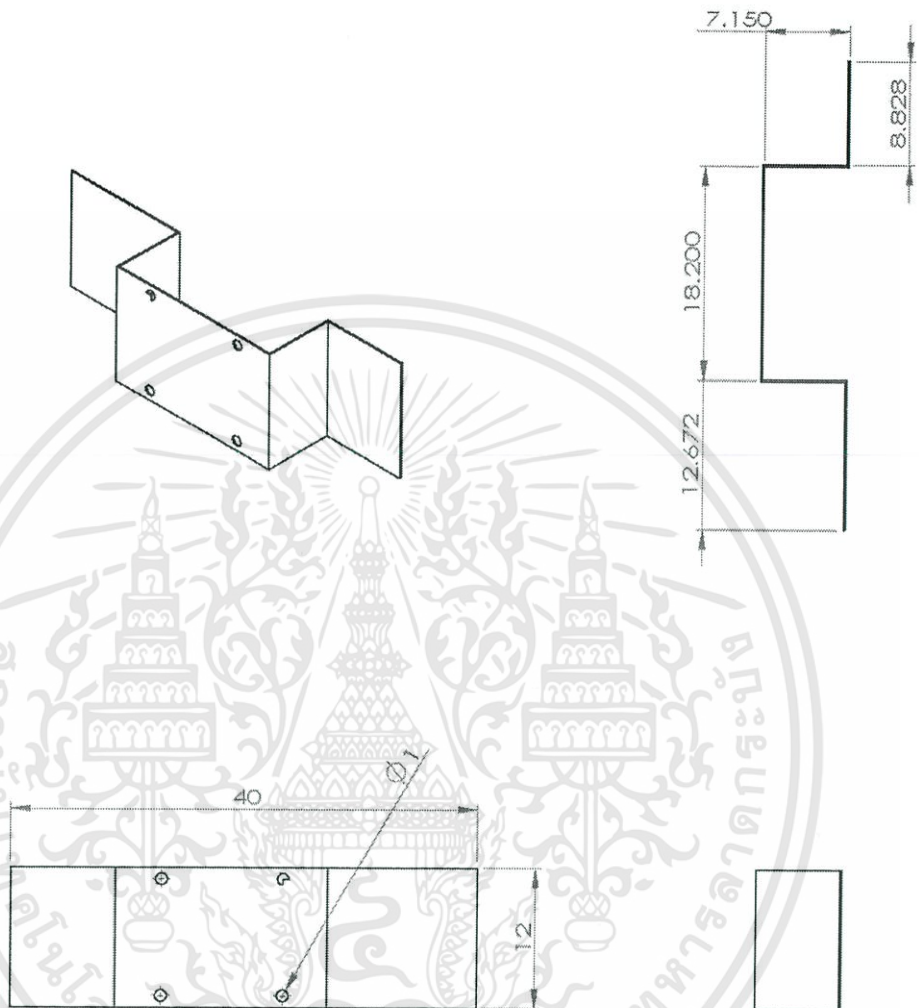


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก5
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH:			DEBUR AND BREAK SHARP EDGES			DO NOT SCALE DRAWING			REVISION		
SURFACE FINISH:														
TOLERANCES:														
LINEAR:														
ANGULAR:														
	NAME	SIGNATURE	DATE						TITLE:					
DRAWN									bottom box					
CHECKED														
APPROVED														
WFO														
D.A.						MATERIAL:		DWG. NO.				A4		
						WEIGHT:		SCALE: 1:10				SHEET 1 OF 1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก6
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:									
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:			
DRAWN						TV holder			
CHECK'D									
APPV'D									
W/C									
O.A.				MATERIAL:		DWG. NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก7
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: HOLE: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REGION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
AS'D									
D.A.				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:20		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผก8
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์วีรทัศน์ภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมวิเคราะห์รีวิวสีโดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่สนใจกับตาราง Michel-levy ใน Matlab

```
clear;clc;close all;
%-----Input-----%
c_value = 2.54; %Constant
%
co_x_start= 101; %Range of coordinate used in photoelastic result
co_x_end = 101; %Range of coordinate used in photoelastic result
co_y_start = 117; %Range of coordinate used in photoelastic result
co_y_end = 117; %Range of coordinate used in photoelastic result
%
use_thickness = false; %Use the data from the birefringence diagram that pertain to certain thickness
sample_thickness = 3.2; %If use_thickness = true, make sure that sample_thickness is between
thickness_top and thickness_bottom.
tol_thickness = 10;%Tolerance for thickness in terms of pixels
thickness_top = 0.06; %Thickness range in the birefringence diagram
thickness_bottom = 0; %Thickness range in the birefringence diagram
%
tol_color_start = 20;%Tolerance for color
number_of_matching_point = 1; %Target number of matching points in order to calculate the mean
retardation.
%
%Coordinate of the color-data in birefringence diagram. This is because the
%diagram contain other pixels that are not the relevant information.
offset_column = 72;
end_column = 507 + offset_column;
row_top = 54;
row_bottom = 394;
%
%Plotting
overplot_matching_point = true;
%-----Error Checking-----%
if use_thickness
```

```

if sample_thickness > max(thickness_top,thickness_bottom)
    error('Sample thickness is too thick.')
end
end
end
%-----Code-----%
a = imread('birefringence.jpg'); %Chart
b = imread('sample.jpg');

sweep_x = co_x_start:co_x_end;
sweep_y = co_y_start:co_y_end;
num_x = co_x_end-co_x_start+1;
num_y = co_y_end-co_y_start+1;

figure(1);image(b);%axis equal tight;
line([co_y_start co_y_start],[co_x_start co_x_end])
line([co_y_end co_y_end],[co_x_start co_x_end])
line([co_y_start co_y_end],[co_x_start co_x_start])
line([co_y_start co_y_end],[co_x_end co_x_end])
%%{
stress_array = zeros(num_x,num_y);
retard_array = zeros(num_x,num_y);
%data_array = zeros(num_x,num_y,2);
tol_color_in = tol_color_start;
for i = 1:num_x
    for j = 1:num_y
        co_x_b = sweep_x(i);
        co_y_b = sweep_y(j);
        [stress, retard, tol_color, data_out] = calculate_stress(a,b,co_x_b,co_y_b,use_thickness,...
            sample_thickness,tol_thickness ,tol_color_in,...
            offset_column,row_top,row_bottom,...
            thickness_top,thickness_bottom,c_value,end_column,number_of_matching_point);
        tol_color_in = tol_color;
        stress_array(i,j) = stress;
    end
end
end

```

```

retard_array(i,j) = retard;
data_array(i,j).data = data_out;
fprintf('finish co_x = %i, co_y = %i, retard = %i \n', co_x_b, co_y_b, retard)
end
end
%}
figure(3); image(a); axis equal tight; hold on
if overplot_matching_point
for i = 1:num_x
for j = 1:num_y
[ndata,~,~] = size(data_array(i,j).data);
for k = 1:ndata
co_x = data_array(i,j).data(k,1);
co_y = data_array(i,j).data(k,2);
plot(co_y,co_x,'b.','markersize',30)
end
end
end
end
save('save_data.mat','stress_array')
plot_stress(stress_array)

```

โปรแกรมแสดงคำสั่งการคำนวณหาค่าความเค้นใน Matlab

```
function [stress, retard, tol_color, data_out] = calculate_stress(a,b,co_x_b,co_y_b,use_thickness,...  
    sample_thickness,tol_thickness ,tol_color_start,...  
    offset_column,row_top,row_bottom,...  
    thickness_top,thickness_bottom,c_value,end_column,number_of_matching_point)
```

```
r_b = b(co_x_b,co_y_b,1);  
g_b = b(co_x_b,co_y_b,2);  
b_b = b(co_x_b,co_y_b,3);  
%Plot the photo that contains the target spot  
%figure(1);image(b);axis equal tight;hold on  
%Plot the color spot on the photo  
%plot(co_y_b,co_x_b,'b.','markersize',30)  
%figure(2);  
%Plot color on a separate window  
%c(1,1,1)=r_b;  
%c(1,1,2)=g_b;  
%c(1,1,3)=b_b;  
%image(c);  
%Calculate the appropriate range for the specified sample thickness  
if use_thickness  
    array_thick = linspace(thickness_top, ...  
        thickness_bottom,row_bottom-row_top+1);  
    array_thick_sub = abs(array_thick - sample_thickness);  
    [~, thick_position] = min(array_thick_sub);  
    half_tol_thickness = floor(tol_thickness/2);  
    thick_range = [thick_position + row_top - half_tol_thickness, ...  
        thick_position + row_top + half_tol_thickness];  
else  
    thick_range = [row_top, row_bottom];  
end
```

```

continue_loop = true;
tol_color = tol_color_start;
count_previous = 100000;
while continue_loop
    [count_point,data] = find_matching_color(a,r_b,g_b,b_b,tol_color...
        ,thick_range,offset_column,end_column);
    if count_point == number_of_matching_point
        continue_loop = false;
    elseif count_point < number_of_matching_point
        tol_color = tol_color + 1;
    elseif (count_point > number_of_matching_point) && (count_previous > number_of_matching_point)
        tol_color = tol_color - 1;
    elseif (count_point > number_of_matching_point) && (count_previous < number_of_matching_point)
        continue_loop = false;
    end
    count_previous = count_point;
end

%plot_points(a,data,count_point)

for i = 1:count_point
    co_y = data(i,1,2);
    rt(i) = find_retardation(co_y,offset_column);
end
%
retard = mean(rt);
%
stress = retard/c_value/sample_thickness;
data_out = data;
end

```

โปรแกรมแสดงเงื่อนไขการจับคู่ของสีใน Matlab

```
function [count_point,data] = find_matching_color(a,r_b,...
    g_b,b_b,tol_color,thick_range,offset_column,end_column)
found_pixel = false;
count_point = 0;
index_data = 1;
for j = offset_column:end_column
    for i = thick_range(1):thick_range(2)
        r_a = a(i,j,1);
        g_a = a(i,j,2);
        b_a = a(i,j,3);
        if ( ((r_b <= r_a+tol_color) && (r_b >= r_a-tol_color)) ...
            && ((g_b <= g_a+tol_color) && (g_b >= g_a-tol_color)) ...
            && ((b_b <= b_a+tol_color) && (b_b >= b_a-tol_color)) ...
        )
            %fprintf('Found coordinate: x= %i y=%i \n',i,j)
            co_x = i;
            co_y = j;
            found_pixel=true;
            data(index_data,1,1) = co_x;
            data(index_data,1,2) = co_y;
            index_data = index_data + 1;
            count_point = count_point + 1;
            %plot(co_y,co_x,'b.','markersize',30)
        end
    end
end
if ~found_pixel
    count_point=0;
    data = 0;
end
end
```

ผข7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมแสดงขอบเขตเงื่อนไขของค่า Retardation ในแต่ละจุดบนกราฟ Michel-levy

```
function rt = find_retardation(y,offset)
%first order
if y == 0 + offset
    rt = 0;
elseif (y>0 + offset) && (y<=8 + offset);
    rt = 40;
elseif (y>8+offset) && (y<=20 + offset);
    rt=100;
elseif (y>20+offset) && (y<=30 + offset);
    rt=160;
elseif (y>30+offset) && (y<=42 + offset);
    rt=220;
elseif (y>42+offset) && (y<=51 + offset);
    rt=235;
elseif (y>51+offset) && (y<=66 + offset);
    rt=260;
elseif (y>66+offset) && (y<=74 + offset);
    rt=270;
elseif (y>74+offset) && (y<=82 + offset);
    rt=275;
elseif (y>82+offset) && (y<=84 + offset);
    rt=280;
elseif (y>84+offset) && (y<=86 + offset);
    rt=305;
elseif (y>86+offset) && (y<=94 + offset);
    rt=330;
elseif (y>94+offset) && (y<=105 + offset);
    rt=430;
elseif (y>105+offset) && (y<=118 + offset);
    rt=505;
elseif (y>118+offset) && (y<=126 + offset);
    rt=535;
```

```

elseif (y>126+offset) && (y<=133 + offset);
    rt=550;
%second order
elseif (y>133+offset) && (y<=143 + offset);
    rt=565;
elseif (y>143+offset) && (y<=153 + offset);
    rt=575;
elseif (y>153+offset) && (y<=168 + offset);
    rt=590;
elseif (y>168+offset) && (y<=176 + offset);
    rt=665;
elseif (y>176+offset) && (y<=186 + offset);
    rt=730;
elseif (y>186+offset) && (y<=194 + offset);
    rt=750;
elseif (y>194+offset) && (y<=201 + offset);
    rt=825;
elseif (y>201+offset) && (y<=207 + offset);
    rt=845;
elseif (y>207+offset) && (y<=214 + offset);
    rt=865;
elseif (y>214+offset) && (y<=224 + offset);
    rt=910;
elseif (y>224+offset) && (y<=241 + offset);
    rt=950;
elseif (y>241+offset) && (y<=256 + offset);
    rt=1000;
elseif (y>256+offset) && (y<=273 + offset);
    rt=1100;
%third order
elseif (y>273+offset) && (y<=282 + offset);
    rt=1130;
elseif (y>282+offset) && (y<=291 + offset);

```

```

rt=1150;
elseif (y>291+offset) && (y<=297 + offset);
rt=1260;
elseif (y>297+offset) && (y<=306 + offset);
rt=1335;
elseif (y>306+offset) && (y<=316 + offset);
rt=1375;
elseif (y>316+offset) && (y<=339 + offset);
rt=1425;
elseif (y>339+offset) && (y<=357 + offset);
rt=1495;
elseif (y>357+offset) && (y<=368 + offset);
rt=1535;
elseif (y>368+offset) && (y<=388 + offset);
rt=1620;
elseif (y>388+offset) && (y<=413 + offset);
rt=1650;
%fourth order
elseif (y>413+offset) && (y<=426 + offset);
rt=1680;
elseif (y>426+offset) && (y<=437 + offset);
rt=1710;
elseif (y>437+offset) && (y<=448 + offset);
rt=1745;
elseif (y>448+offset) && (y<=460 + offset);
rt=1810;
elseif (y>460+offset) && (y<=472 + offset);
rt=1930;
elseif (y>472+offset) && (y<=490 + offset);
rt=2010;
elseif (y>490+offset) && (y<=507 + offset);
rt=2050;
end

```

ผข10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคำสั่งแสดงจุดที่เปรียบเทียบบนกราฟ Michel-levy ใน Matlab

```
function [] = plot_points(a,data,count)
```

```
figure(3); image(a); axis equal tight; hold on
```

```
for i = 1:count
```

```
    co_x = data(i,1,1);
```

```
    co_y = data(i,1,2);
```

```
    plot(co_y,co_x,'b.','markersize',30)
```

```
end
```



โปรแกรมคำสั่งแสดงกราฟความเค้นที่คำนวณออกมาได้จากโปรแกรมในแต่ละจุดใน Matlab

```
function [] = plot_stress(stress)
[n_row n_col] = size(stress);
co_row_start = 1;
co_row_end = n_row;
co_col_start = 1;
co_col_end = n_col;

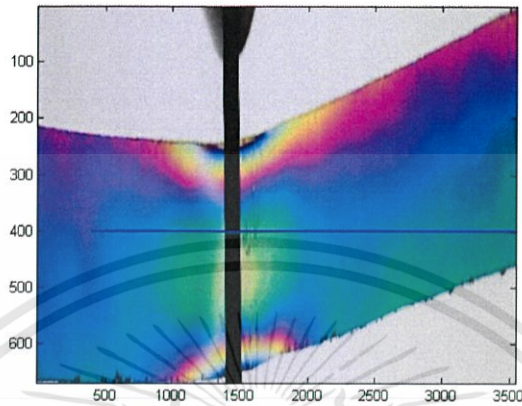
%figure(3); hold on
%contour(stress)
%axis tight equal
%xlabel('y')
%ylabel('x')
%line([co_col_start co_col_start],[co_row_start co_row_end])
%line([co_col_end co_col_end],[co_row_start co_row_end])
%line([co_col_start co_col_end],[co_row_start co_row_start])
%line([co_col_start co_col_end],[co_row_end co_row_end])
mean_array = zeros(co_col_end-co_col_start+1,1);
for i = 1 : co_col_end-co_col_start+1
    co_col = i + co_col_start - 1;
    mean_value = mean(stress(co_row_start:co_row_end ,co_col));
    mean_array(i) = mean_value;
end
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

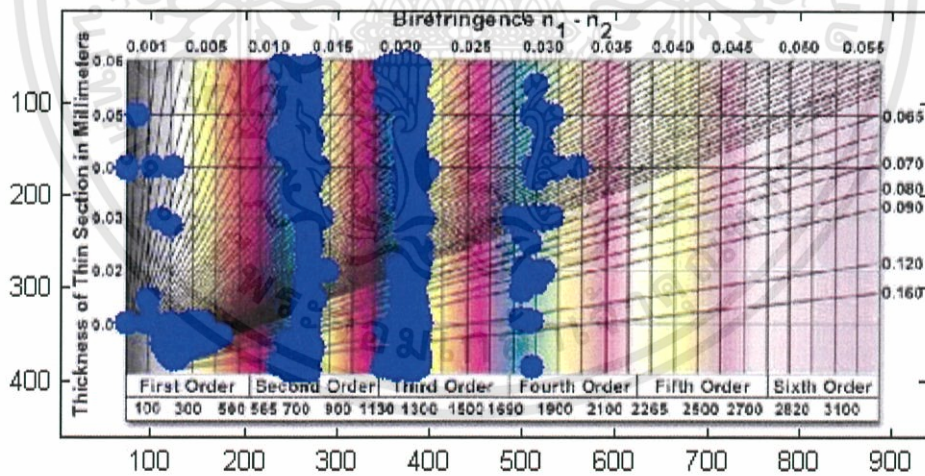
3. Run โปรแกรมโดยกด F5 หรือเลือกคำสั่ง Run เมื่อโปรแกรม Run เสร็จโปรแกรมจะแสดงรูป 3รูป ดังนี้คือ

3.1 รูปที่ ผค3 แสดงขอบเขตที่เลือกบนชิ้นงาน โดยจะแสดงเป็นกรอบสีน้ำเงินลงบนภาพชิ้นงาน



รูปที่ ผค3 แสดงขอบเขตที่สนใจลงบนภาพชิ้นงาน

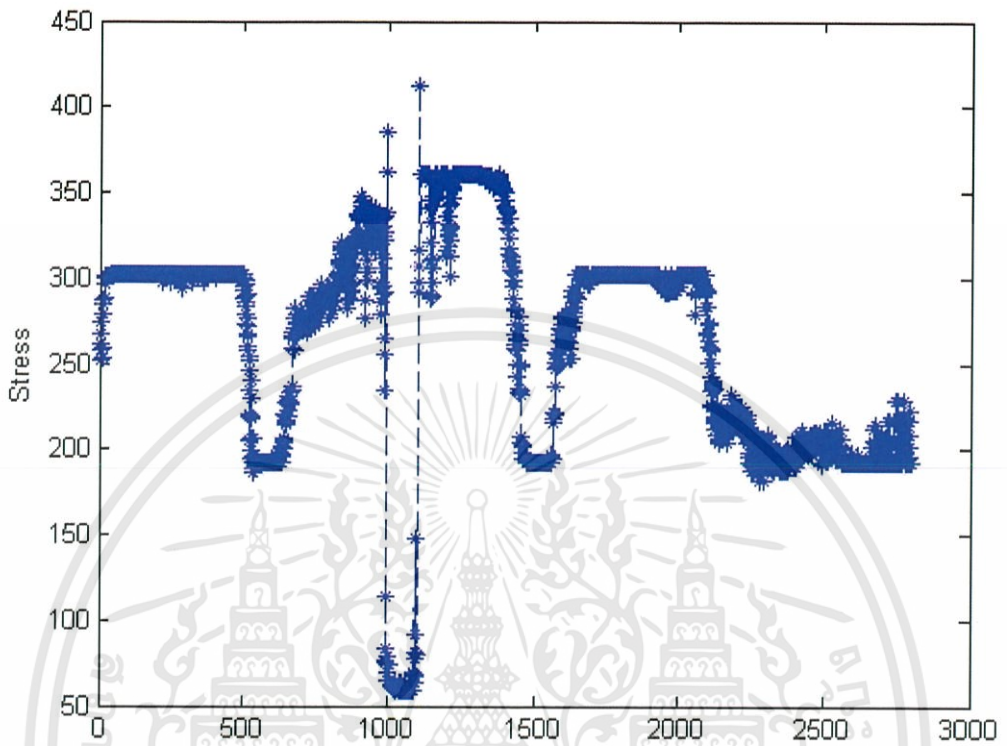
3.2 แสดงจุดที่หาเจอจากการเทียบสีจากรูปภาพชิ้นงานกับกราฟ Michel-levy โดยจะ plot จุดเป็นสีน้ำเงิน



รูปที่ ผค4 แสดงการ plot จุดที่ได้จากการเทียบสีจากรูปภาพชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผค3 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แสดงกราฟของความเค้น กราฟที่ถูก plot ขึ้นได้จากการคำนวณค่าความเค้นของโปรแกรม ณ จุดต่างๆ จากขอบเขตที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ ผค5 แสดงกราฟความเค้นของขอบเขตที่สนใจบนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผค4 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงผลของโปรแกรมในแต่ละหน้าหลัก

- การแสดงผลของโปรแกรมที่น้ำหนัก 1 kg
เลือกไฟล์ที่จะนำมาวิเคราะห์โดยกำหนดชื่อไฟล์ลงในกรอบสีน้ำเงินในรูปที่ ผศ6

```
22 - end_column = 507 + offset_column;
23 - row_top = 54;
24 - row_bottom = 394;
25 - %
26 - %Plotting
27 - overplot_matching_point = true;
28 - %-----Error Checking-----
29 - if use_thickness
30 -     if sample_thickness > max(thickness_top,thickness_bottom)
31 -         error('Sample thickness is too thick.')
32 -     end
33 - end
34 - %-----Code-----
35 - a = imread('birefringence.png'); %Chart
36 - b = imread('1kg5.jpg');
37 -
38 - sweep_x = co_x_start:co_x_end;
39 - sweep_y = co_y_start:co_y_end;
40 - num_x = co_x_end-co_x_start+1;
41 - num_y = co_y_end-co_y_start+1;
42 -
43 - figure(1);image(b);%axis equal tight;
44 - line([co v_start co v_start],[co x_start co x_end]);
```

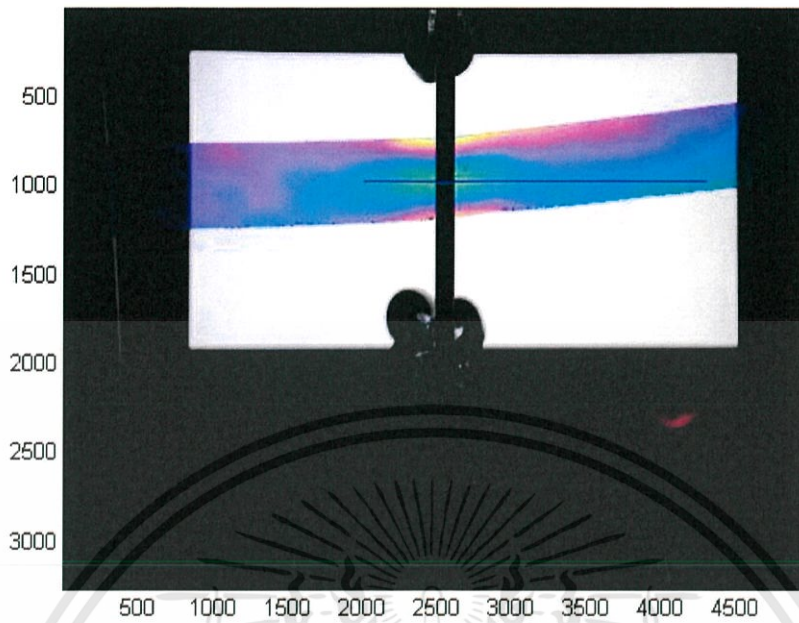
รูปที่ ผศ6 แสดงการใส่ชื่อไฟล์ที่น้ำหนักถ่วง 1 kg

- เลือกขอบเขตบริเวณกรอบสีแดงดังรูปที่ ผศ7

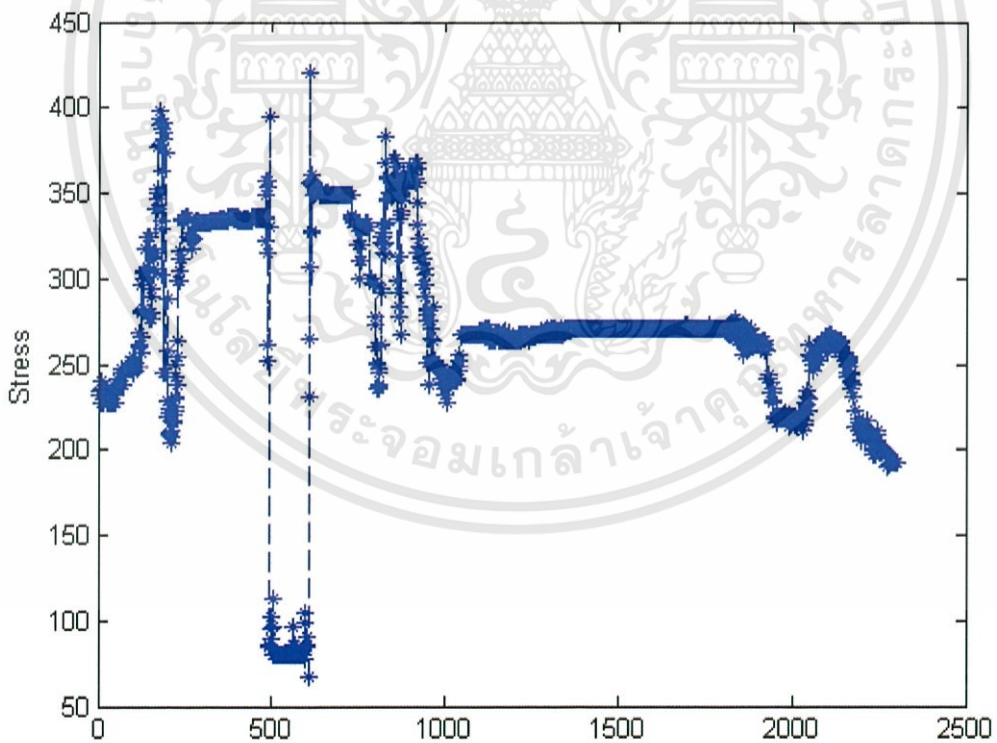
```
Editor - C:\Users\Acer\Desktop\งาน\matlab for project\VB test\driver_v8.m*
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
1 - clear;clc;close all;
2 - %-----Input-----
3 - c_value = 2.54 ; %Constant
4 -
5 - co_x_start= 1000; %Range of coordinate used in photoelastic result
6 - co_x_end = 1002; %Range of coordinate used in photoelastic result
7 - co_y_start = 2000; %Range of coordinate used in photoelastic result
8 - co_y_end = 4400; %Range of coordinate used in photoelastic result
9 -
10 - use_thickness = false; %Use the data from the birefringence diagram that pertain to cert
11 - sample_thickness = 1.5; %If use_thickness = true, make sure that sample_thickness is be
12 - tol_thickness = 10;%Tolerance for thickness in terms of pixels
13 - thickness_top = 0.06; %Thickness range in the birefringence diagram
14 - thickness_bottom = 0; %Thickness range in the birefringence diagram
15 - %
```

รูปที่ ผศ7 แสดงขอบเขตของการวิเคราะห์ที่น้ำหนักถ่วง 1kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผศ5 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

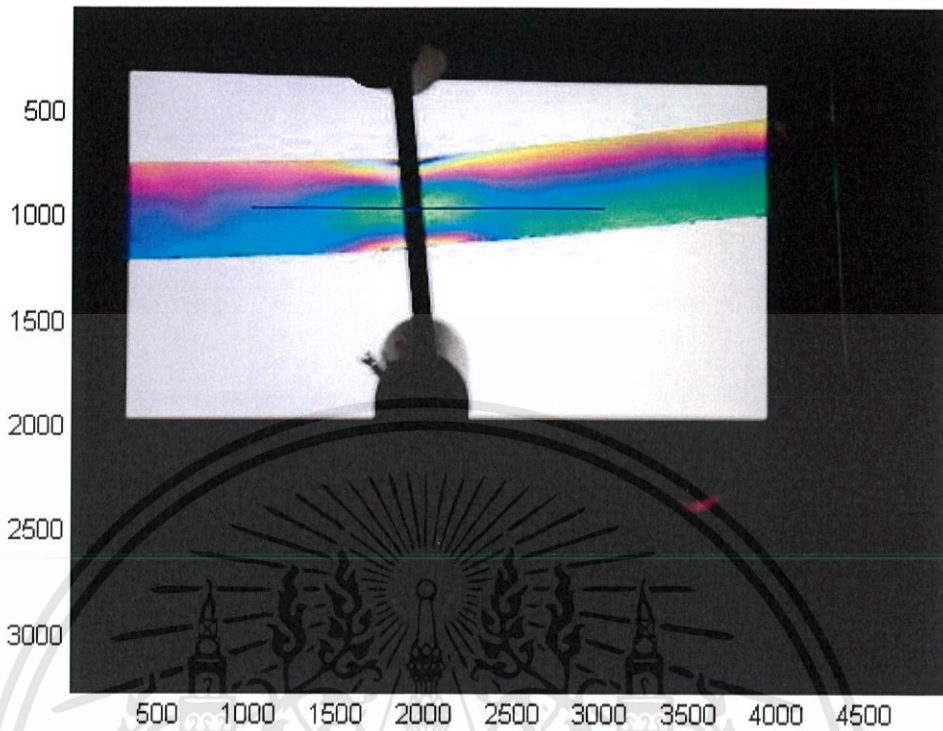


รูปที่ ผค8 แสดงกรอบของขอบเขตที่เลือกบนภาพชิ้นงาน

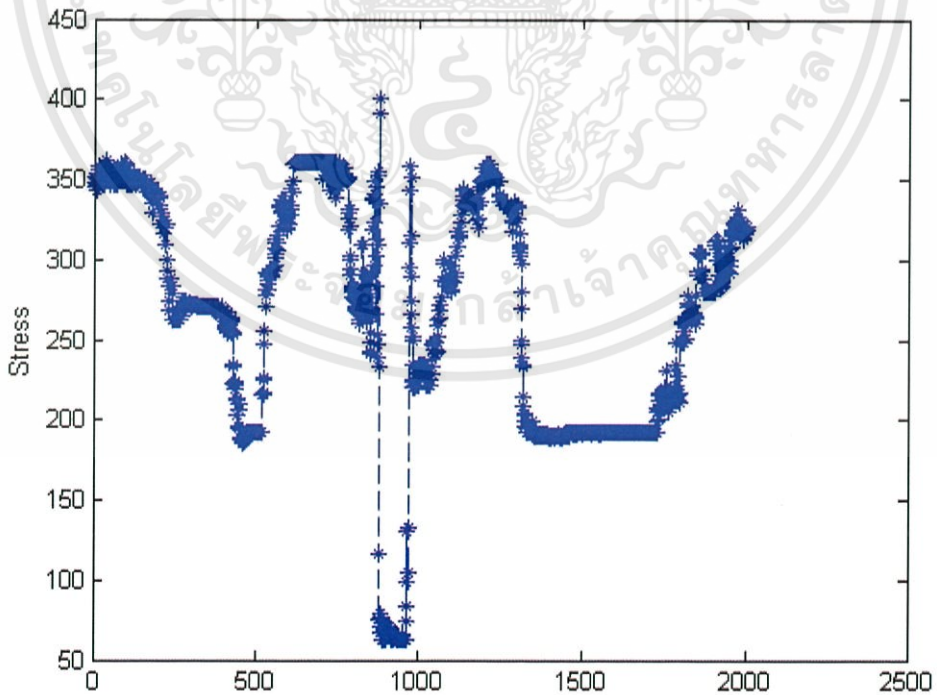


รูปที่ ผค9 แสดงกราฟของความเค้นที่น้ำหนักถ่วง 1 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

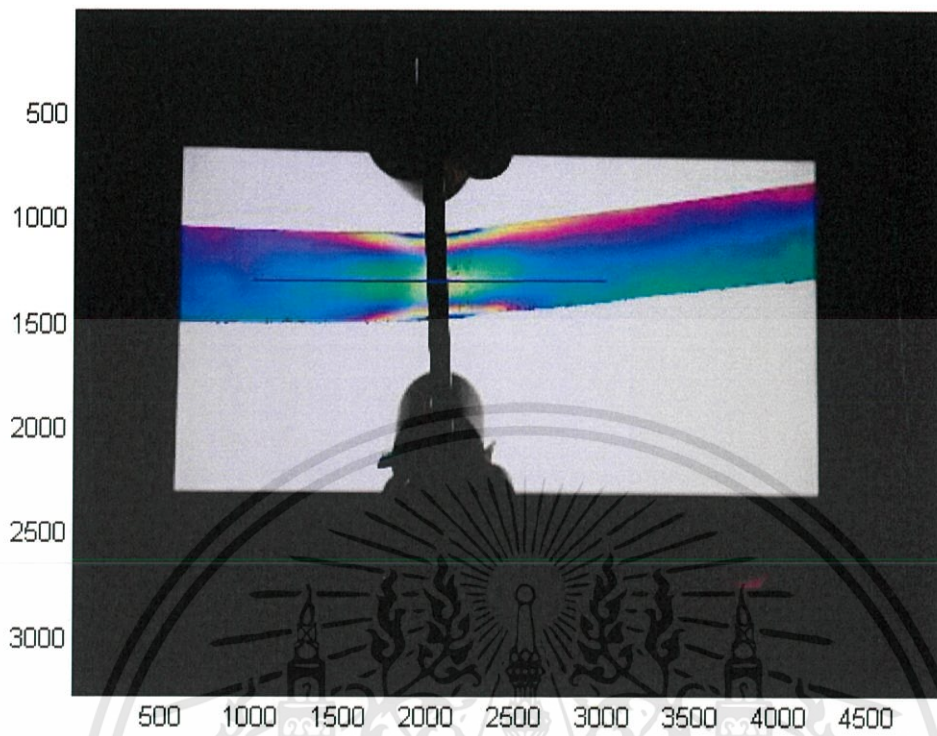


รูปที่ ผค12 แสดงกรอบของขอบเขตที่เลือกบนภาพชิ้นงาน

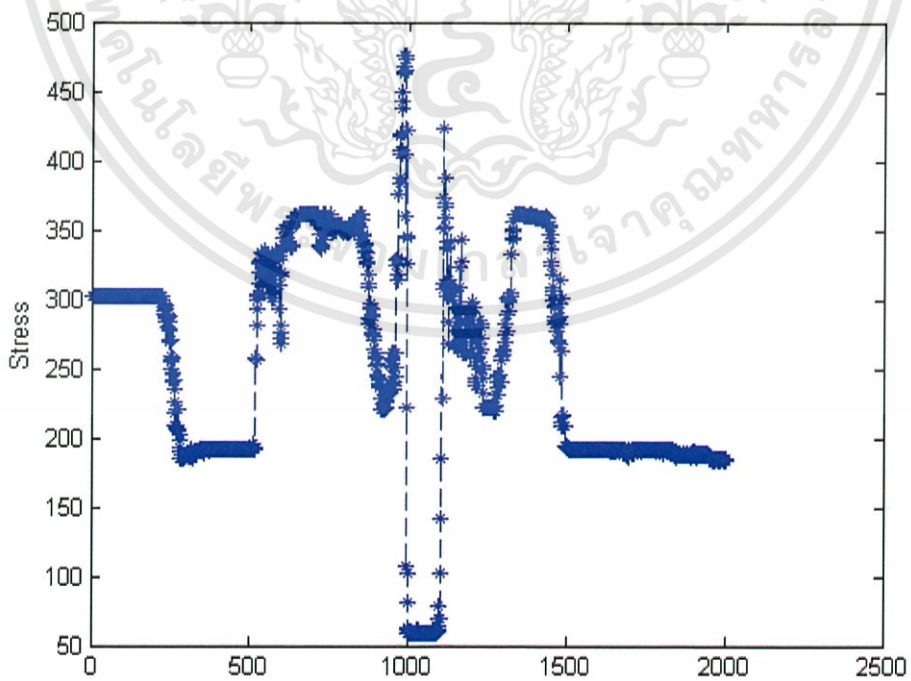


รูปที่ ผค13 แสดงกราฟของความเค้นที่น้ำหนักถ่วง 2kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผค8 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

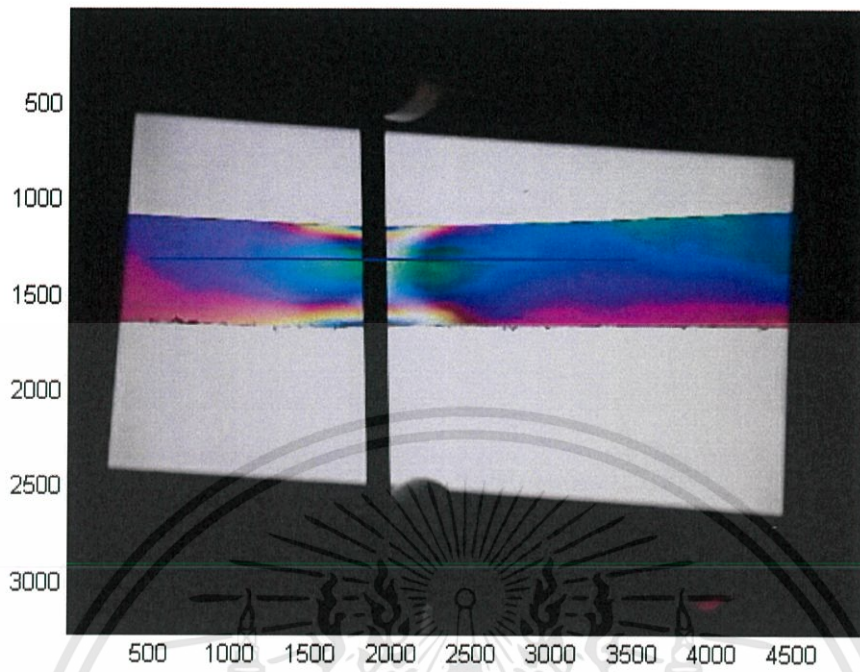


รูปที่ ผค16 แสดงกรอบของขอบเขตที่เลือกบนภาพชิ้นงาน

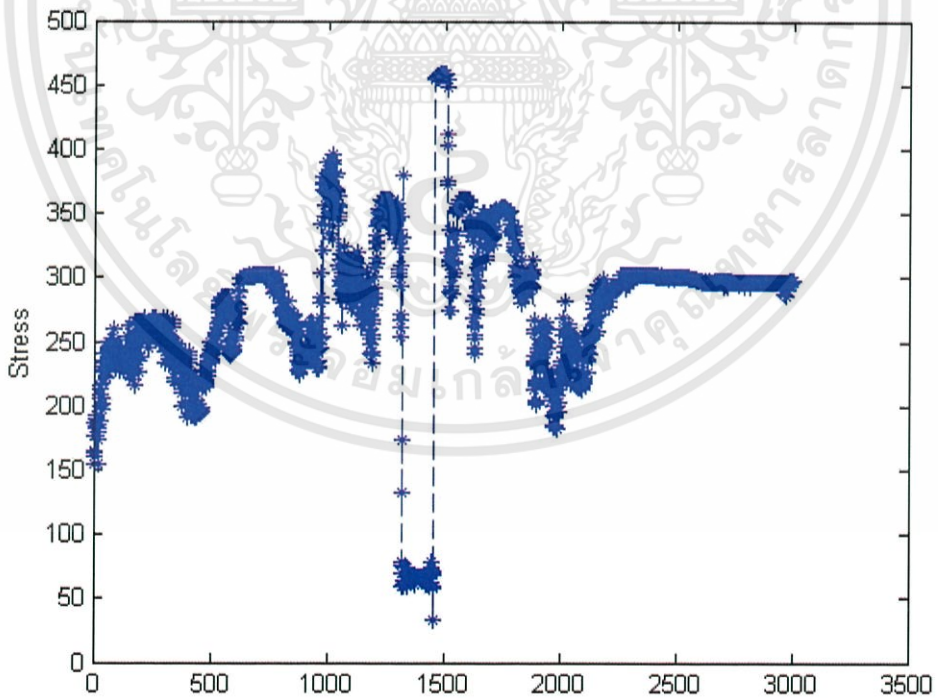


รูปที่ ผค17 แสดงกราฟของความเค้นที่น้ำหนักถ่วง 3 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ ผค10 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ ผค20 แสดงกรอบของขอบเขตที่เลือกบนภาพชิ้นงาน



รูปที่ ผค21 แสดงกราฟของความเค้นที่น้ำหนักถ่วง 4kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ ผค12 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



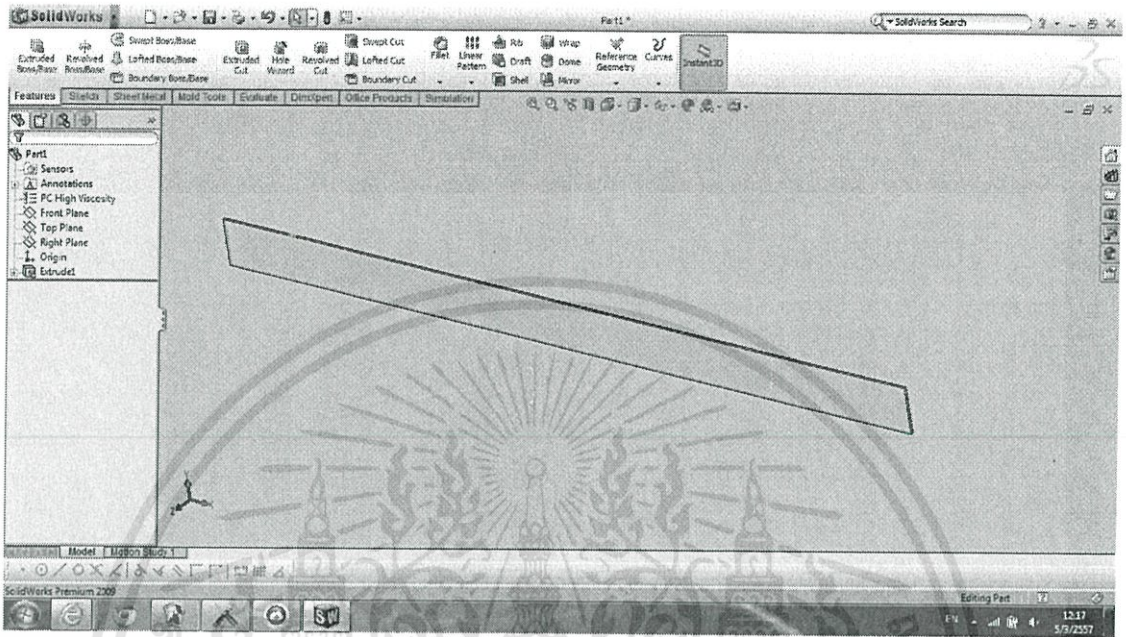
ภาคผนวก ง

ขั้นตอนการ Simulation ของโปรแกรม Solidwork
และขั้นตอนการคำนวณหาสมการความเค้นแต่ละหน้าหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

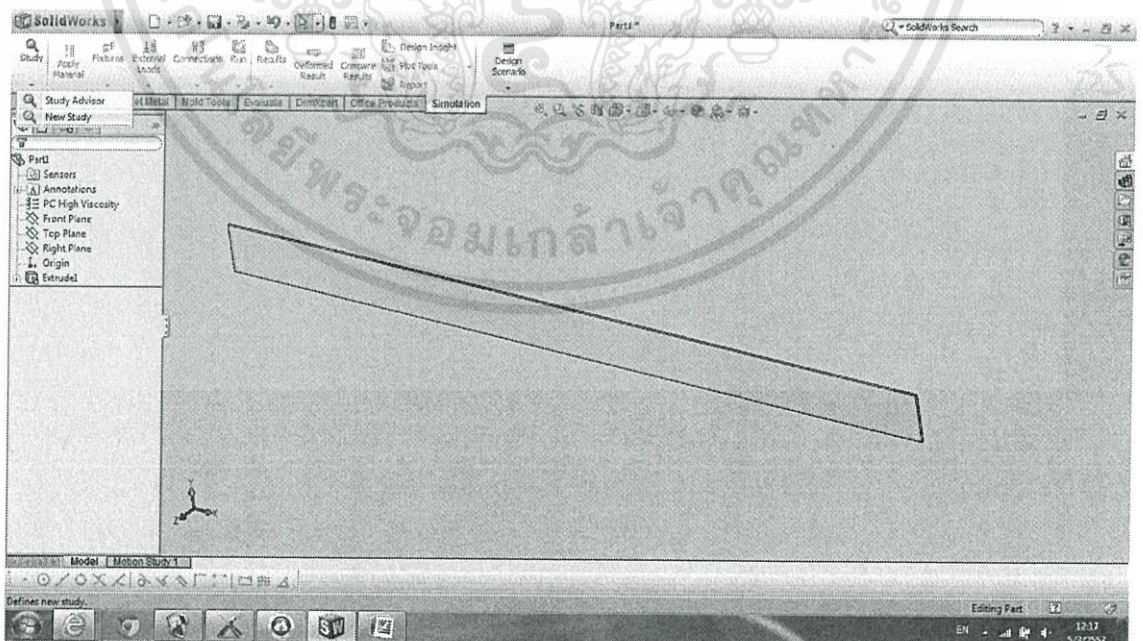
แสดงขั้นตอนของการใส่แรงลงไปที่ชิ้นงานในโปรแกรมโซลิดเวิร์ค

1. ทำการวาดแบบจำลองของชิ้นงานลงในโปรแกรม Solidwork โดยมีขนาดเท่ากับ $3 \times 50 \times 0.15$ ซม. ดังรูปที่ ผง1



รูปที่ ผง1 รูปชิ้นงานที่มีขนาดเท่ากับชิ้นงานที่ทำการทดลองจริง

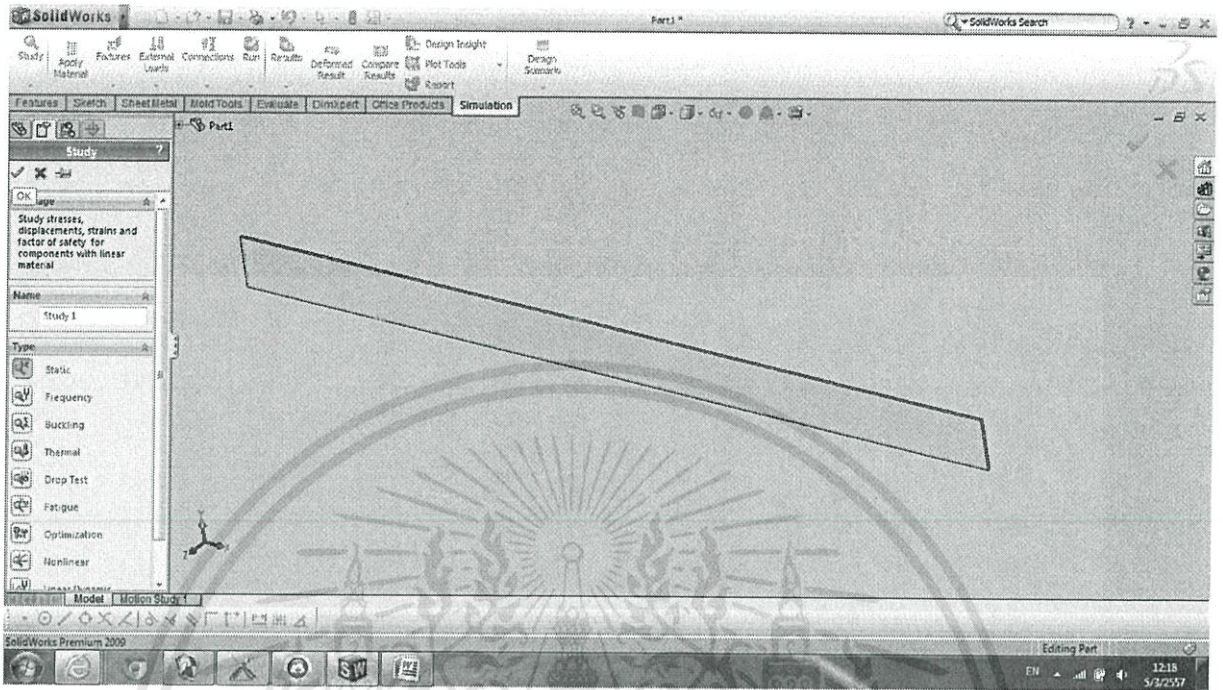
2. เลือกคำสั่ง Simulation ต่อจากนั้นเลือกที่ New Study ดังรูปที่ ผง2



รูปที่ ผง2 เริ่มขั้นตอนการทำ Simulation

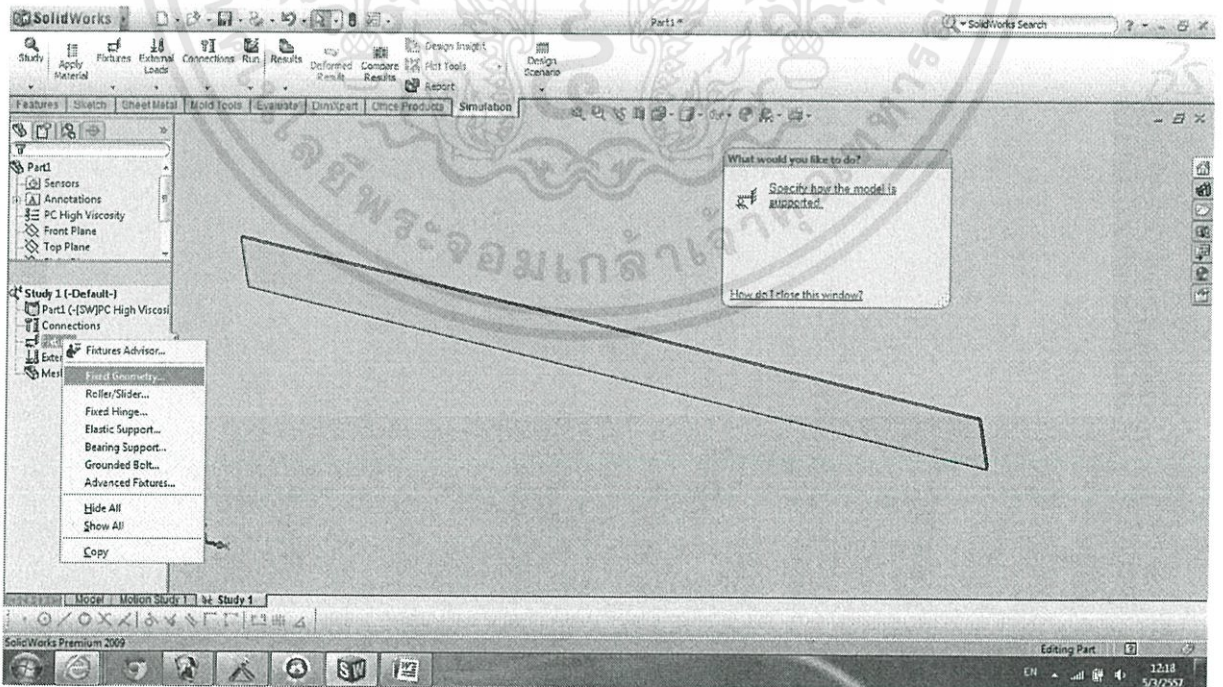
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.เลือก static แล้วคลิกเครื่องหมายถูกสีเขียวดังรูปที่ ผง3



รูปที่ ผง3 คำสั่งstatic

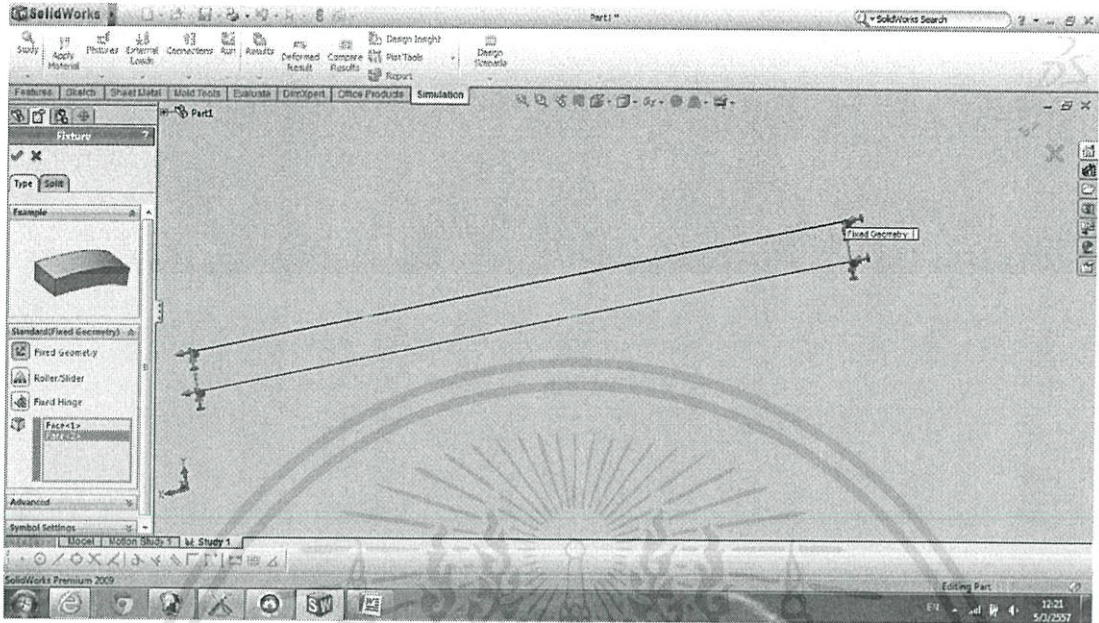
4.คลิกขวาที่คำสั่ง Fixtures แล้วเลือก FixedGeometry ดังรูปที่ ผง4



รูปที่ ผง4 คำสั่ง Fixtures

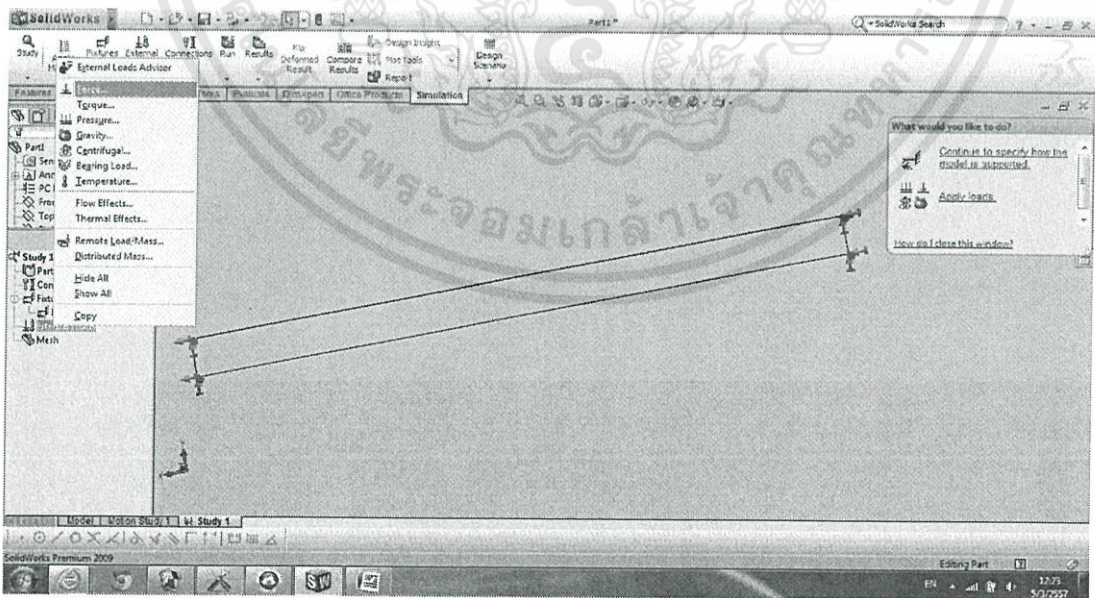
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง3 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เลือกจุดที่ fix ชิ้นงานโดยในที่นี้จะยึดปลายทั้งสองข้างของชิ้นงาน ดังการทดลองจริง แบบการ fix แสดงดังรูปที่ ผง5



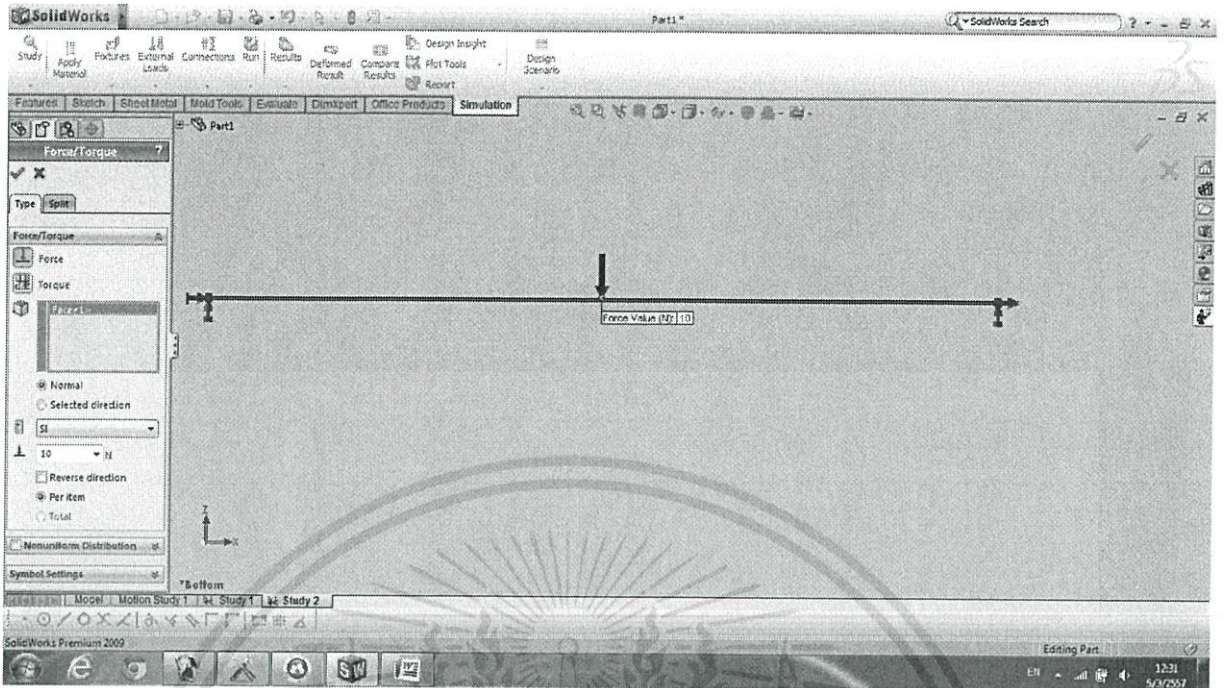
รูปที่ ผง5 คำสั่ง Fix

6. เมื่อกำหนดจุด fix แล้ว ให้ทำการใส่แรงในขนาดต่างๆ ที่ต้องการลงบนชิ้นงานโดยเลือกที่ force ดังรูปที่ ผง6 และ กำหนดจุดที่ให้แรงกระทำตามลูกศรสีม่วงดังรูปที่ ผง7



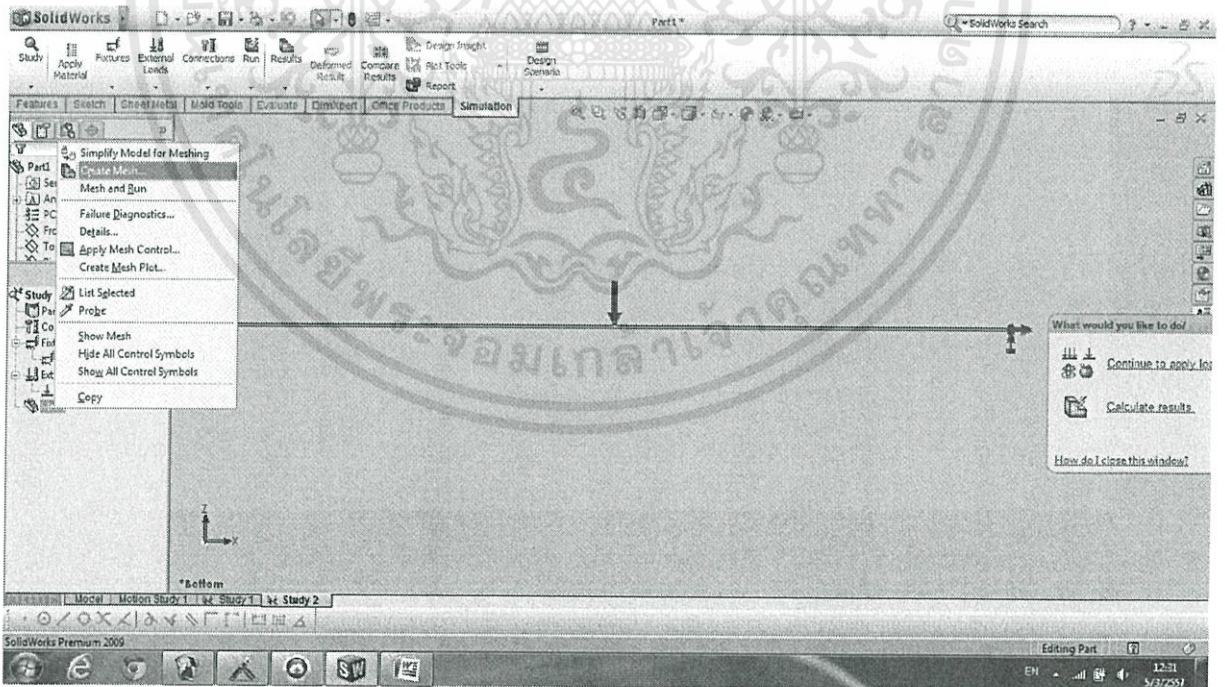
รูปที่ ผง6 ขั้นตอนของการใส่แรงขนาดใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง4 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผง7 กำหนดตำแหน่งที่ใส่แรงขนาดใดๆ

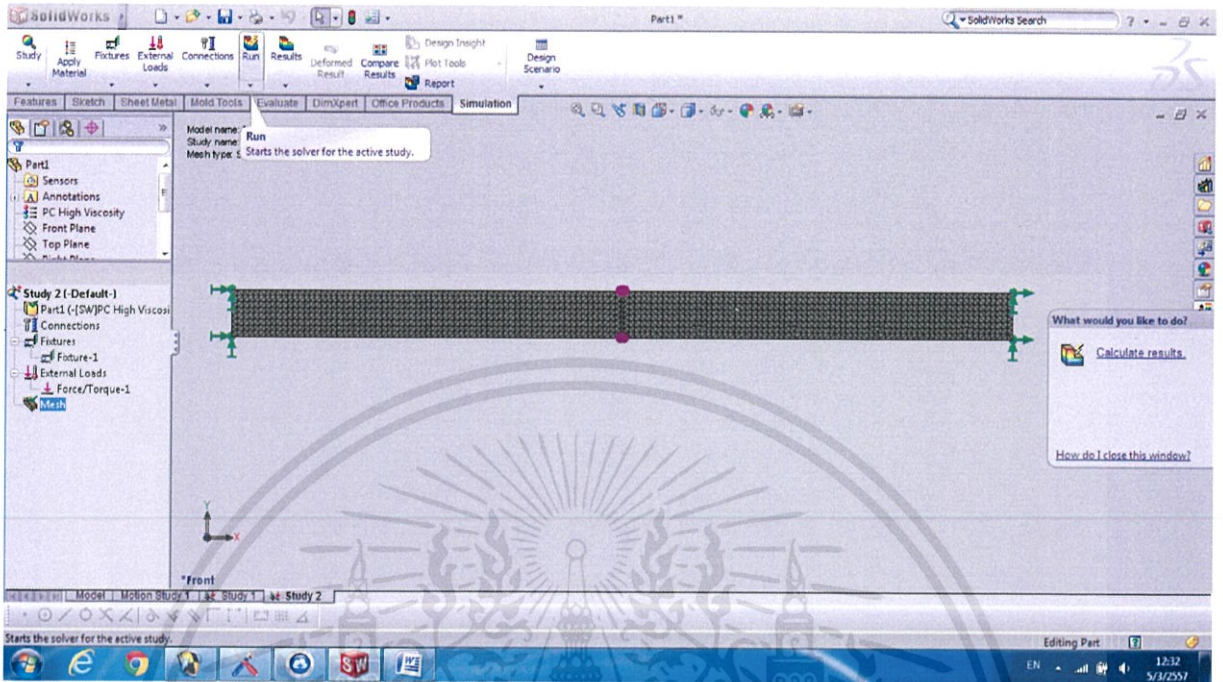
7. เลือก create mesh ดังรูปที่ ผง8



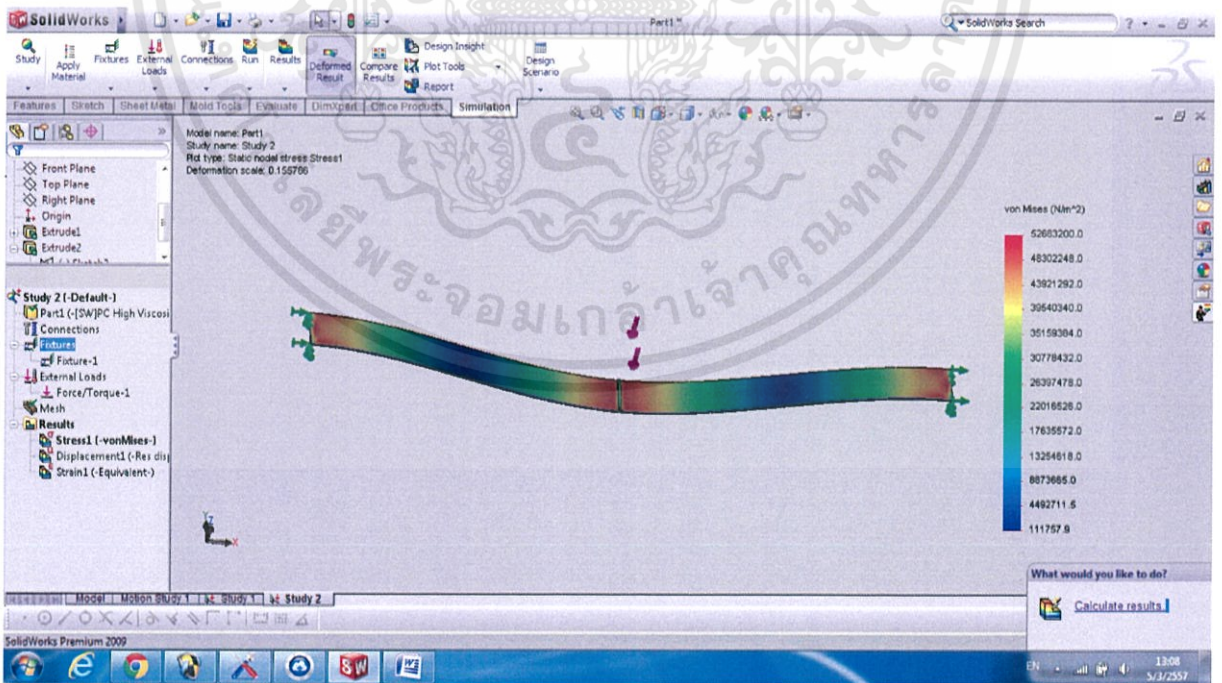
รูปที่ ผง8 คำสั่ง create mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง5 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.เลือก Run ดังรูปที่ ผง9. เพื่อให้Solidwork แสดงผลจำลองของความเค้นบนชิ้นงานดังรูปที่ ผง10



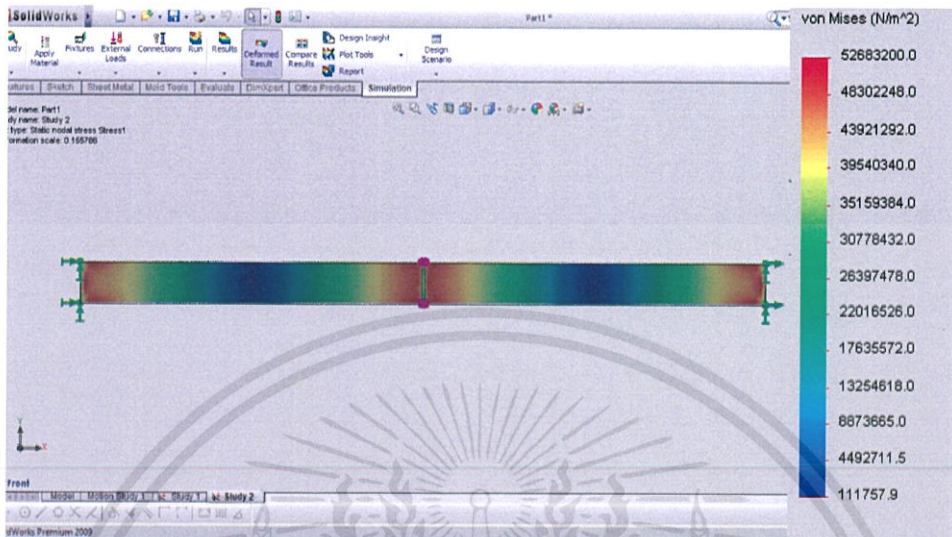
รูปที่ ผง9 คำสั่ง run



รูปที่ ผง10 ผลที่ได้จากการใส่แรงลงบนชิ้นงาน

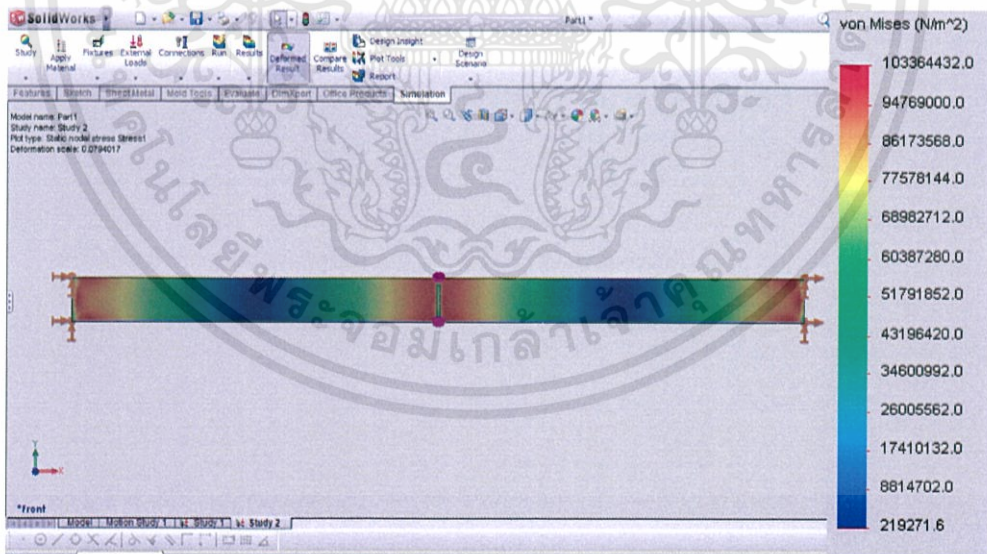
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผง6 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลจากการ simulation ของ Solidwork ที่น้ำหนักต่างๆตามการทดลองดังนี้
1.แสดงผลของความเค้นจากการ simulation ที่ 1kg ดังรูปที่ ผง11



รูปที่ ผง11 แสดงวิธีและความเค้นบนผิวชิ้นงานจำลองจากการใส่แรง 1 kg.

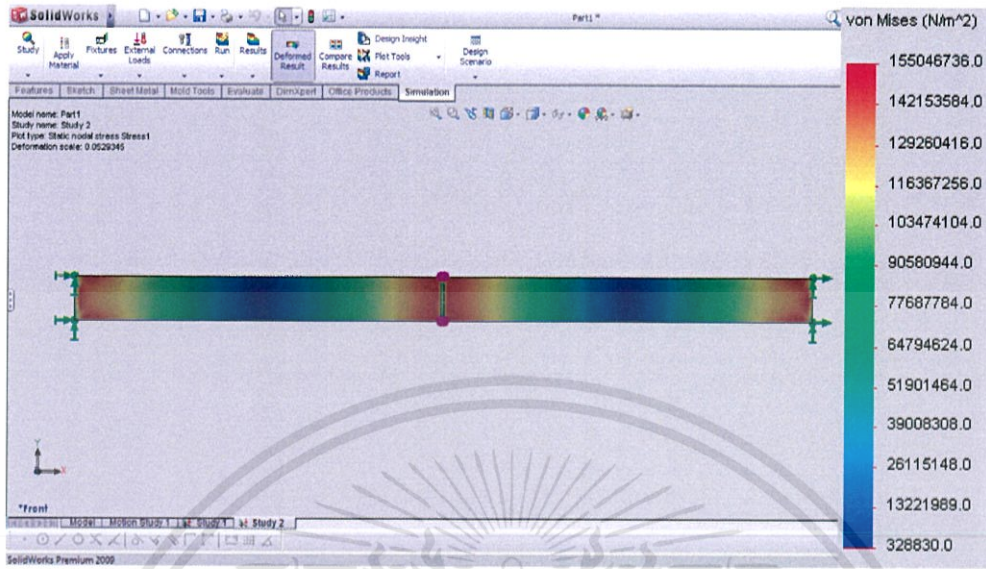
2.แสดงผลของความเค้นจากการ simulation ที่ 2kg ดังรูปที่ ผง12



รูปที่ ผง12 แสดงวิธีและความเค้นบนผิวชิ้นงานจำลองจากการใส่แรง 2 kg.

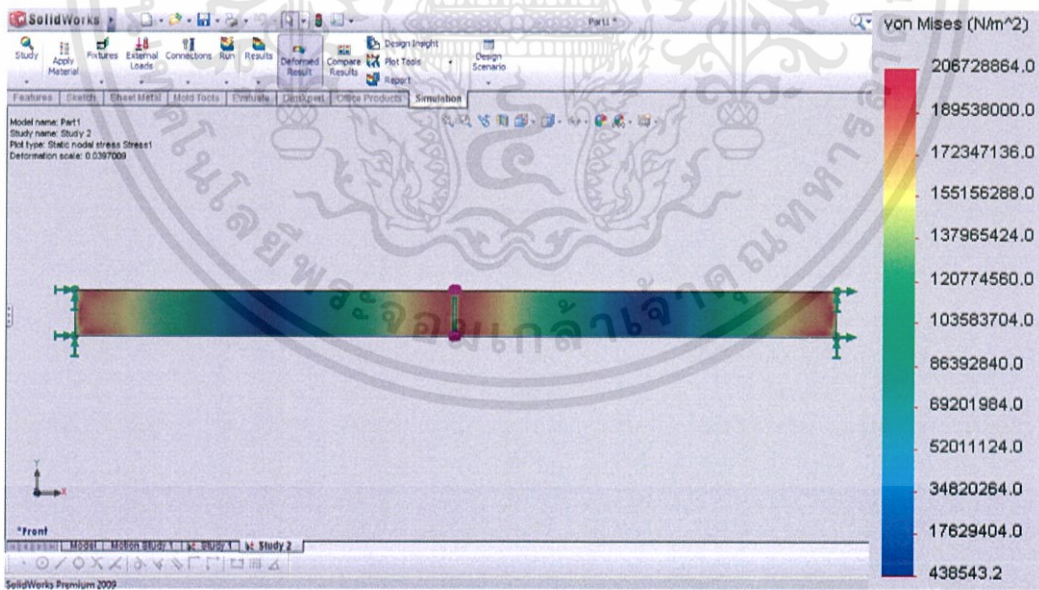
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.แสดงผลของความเค้นจากการ Simulation ที่ 3 kg ดังรูปที่ ผง13



รูปที่ ผง13 แสดงวิธีและความเค้นบนผิวชิ้นงานจำลองจากการใส่แรง 3 kg.

4.แสดงผลของความเค้นจากการ Simulation ที่ 4 kg ดังรูปที่ ผง14



รูปที่ ผง14 แสดงวิธีและความเค้นบนผิวชิ้นงานจำลองจากการใส่แรง 4 kg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความเค้นจากแบบการทดลองนำมาเทียบกับSolidwork

คานยาว 50 เซนติเมตร ปลายยึดติดแน่นทั้งสอง มีแรงมากระทำที่จุดกึ่งกลางเท่ากับ 1 kg 2kg, 3kg 4kg แสดงการหาสมการคำนวณความเค้น ณ ระยะต่างๆบนคานดังนี้ .(ใช้ค่า $g = 9.81 \text{ N/kg}$)

เมื่อมีแรงมากระทำเท่ากับ 9.81 N

$$R_A; \quad 9.81 \times 0.25 = R_B(0.5)$$

$$\frac{2.4525}{0.5} = R_B$$

$$R_B = 4.9050 \text{ N}$$

$$9.81 = R_A + R_B$$

$$R_A = 9.81 - 4.9050$$

$$R_A = 4.9050 \text{ N}$$

$$FEM = \frac{PL}{8} = \frac{9.81 \times 0.5}{8} = 0.6131 \text{ N.m}$$

$$0 \leq x < 25 \quad M = 4.9050X - 0.6131 \text{ N.m}$$

$$25 \leq X < 50 \quad V + 9.81 = 4.9050$$

$$V = 4.9050 - 9.81$$

$$V = -4.9050 \text{ N}$$

$$M = 9.81(0.25) + (-4.9050)X - 0.6131$$

$$M = 2.4525 - 4.9050X - 0.6131$$

$$M = 1.8394 - 4.9050X \text{ N.m}$$

$$C = h/2; \quad C = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2} = 7.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}; \quad I = \frac{0.03 \times 0.0015^3}{12} = 8.4375 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

$$0 \leq x < 25 \quad \sigma = \frac{(4.9050X - 0.6131)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 436000000x - 54497777.78 \quad \text{N/m}^2$$

$$25 \leq x < 50 \quad \sigma = \frac{(1.8394 - 4.9050X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 163502222.2 - 436000000x \quad \text{N/m}^2$$

เมื่อมีแรงกระทำเท่ากับ 19.62 N

$$R_A; \quad 19.62 \times 0.25 = R_B(0.5)$$

$$\frac{4.9050}{0.5} = R_B$$

$$R_B = 9.81 \quad \text{N}$$

$$19.62 = R_A + R_B$$

$$R_A = 19.62 - 9.81$$

$$R_A = 9.81 \quad \text{N}$$

$$FEM = \frac{PL}{8} = \frac{19.62 \times 0.5}{8} = 1.2262 \text{ N.m}$$

$$0 \leq x < 25 \quad M = 9.81X - 1.2262 \text{ N.m}$$

$$25 \leq X < 50 \quad V + 19.62 = 9.81$$

$$V = 9.81 - 19.62$$

$$V = -9.81 \quad \text{N}$$

$$M = 19.62(0.25) + (-9.81)X - 1.2262$$

$$M = 4.9050 - 9.81X - 1.2262$$

$$M = 3.6788 - 9.81X \quad \text{N.m}$$

$$C = h/2; \quad C = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2} = 7.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}; \quad I = \frac{0.03 \times 0.0015^3}{12} = 8.4375 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

$$0 \leq x < 25 \quad \sigma = \frac{(9.81X - 1.2262)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 872000000x - 108995555.6 \quad \text{N/m}^2$$

$$25 \leq x < 50 \quad \sigma = \frac{(3.6788 - 9.81X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 327004444.4 - 872000000x \quad \text{N/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **พจนานุกรม** ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแรงมากระทำเท่ากับ 29.43 N

$$R_A; \quad 29.43 \times 0.25 = R_B(0.5)$$

$$\frac{7.3575}{0.5} = R_B$$

$$R_B = 14.7150 \text{ N}$$

$$29.43 = R_A + R_B$$

$$R_A = 29.43 - 14.7150$$

$$R_A = 14.7150 \text{ N}$$

$$FEM = \frac{PL}{8} = \frac{29.43 \times 0.5}{8} = 1.8393 \text{ N.m}$$

$$0 \leq x < 25 \quad M = 14.7150X - 1.8393 \text{ N.m}$$

$$25 \leq X < 50 \quad V + 29.43 = 14.7150$$

$$V = 14.7150 - 29.43$$

$$V = -14.7150 \text{ N}$$

$$M = 29.43(0.25) + (-14.7150)X - 1.8393$$

$$M = 7.3575 - 14.7150X - 1.8393$$

$$M = 5.5182 - 14.7150X \quad \text{N.m}$$

$$C = h/2;$$

$$C = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2} = 7.5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$I = \frac{bh^3}{12};$$

$$I = \frac{0.03 \times 0.0015^3}{12} = 8.4375 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

$$0 \leq x < 25$$

$$\sigma = \frac{(14.7150X - 1.8393)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 1308000000x - 163493333.3 \quad \text{N/m}^2$$

$$25 \leq x < 50$$

$$\sigma = \frac{(5.5182 - 14.7150X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \quad \text{N/m}^2$$

$$\sigma = 490506666.7 - 1308000000x \quad \text{N/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **พจนานุกรม** ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแรงกระทำเท่ากับ 39.24 N

$$\begin{aligned}
 R_A; \quad 39.24 \times 0.25 &= R_B(0.5) \\
 \frac{9.81}{0.5} &= R_B \\
 R_B &= 19.62 \text{ N} \\
 39.24 &= R_A + R_B \\
 R_A &= 39.24 - 19.62 \\
 R_A &= 19.62 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$FEM = \frac{PL}{8} = \frac{39.24 \times 0.5}{8} = 2.4525 \text{ N.m}$$

$$0 \leq x < 25 \quad M = 19.62X - 2.4525 \text{ N.m}$$

$$25 \leq X < 50 \quad V + 39.24 = 19.62$$

$$V = 19.62 - 39.24$$

$$V = -19.62 \text{ N}$$

$$M = 39.24(0.25) + (-19.62)X - 2.4525$$

$$M = 9.81 - 19.62X - 2.4525$$

$$M = 7.3575 - 19.62X \text{ N.m}$$

$$C = h/2;$$

$$C = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2} = 7.5 \times 10^{-4}$$

$$I = \frac{bh^3}{12};$$

$$I = \frac{0.03 \times 0.0015^3}{12} = 8.4375 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

$$0 \leq x < 25$$

$$\sigma = \frac{(19.62X - 2.4525)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 1744000000x - 218000000 \text{ N/m}^2$$

$$25 \leq x < 50$$

$$\sigma = \frac{(7.3575 - 19.62X)(7.5 \times 10^{-4})}{8.4375 \times 10^{-12}} \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 654000000 - 1744000000x \text{ N/m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ [พจนานุกรม](#) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้